SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

©NASA-ESA-CSA-STScI

HYDROGÈNE VERT
Les promesses
p.42

Télescope James-Webb

Une nouvelle HISTOIRE de L'UNIVERS

p.26

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 916 - JUIN 2023 - JAMES-WEBB : UNE NOUVELLE HISTOIRE DE L'UNIVERS

JUIN 2023 - N° 916 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / DOM 5,90 € / DOM-AVION 7,90 € / ANDORRE 5,40 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.90€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 916 - F: 5,30 € - RD

Jusqu'où peut-on aller

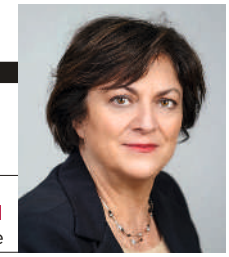
lorsque l'on est bien accompagné ?

Organiser votre patrimoine, préparer une transmission, investir sur les marchés. Vos aspirations n'appartiennent qu'à vous. Nos conseillers et nos experts vous accompagnent pour définir une stratégie financière qui corresponde à vos objectifs et surtout, qui vous corresponde.

Prenez rendez-vous avec un conseiller sur hsbc.fr

HSBC

HSBC Continental Europe – Société anonyme au capital de 1 062 332 775 euros – SIREN 775 670 284 RCS Paris. Siège social : 38 avenue Kléber 75116 Paris. Banque et intermédiaire en assurance immatriculé auprès de l'ORIAS (Organisme pour le Registre des Intermédiaires en Assurance – orias.fr) sous le n° 07 005 894. Crédit photo : Getty Images.



BERNARD MARTINEZ

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

Cygne noir et rhinocéros gris

« La nature fait des expériences que nous essayons de lire. » C'est avec cette expression empreinte d'humilité que le secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences Antoine Triller a ouvert récemment une après-midi spéciale, intitulée « La biodiversité animale comme source d'innovation biomédicale ». L'étonnant, dans ce titre, étant la présence du mot « animal ». Car la moitié des molécules utilisées en pharmacie a une origine végétale, rappelle l'Académie qui se soucie aussi d'innovation. Signe que les temps changent et le regard sur la nature aussi.

Calendes grecques. Signe des temps ? L'idée qu'une nouvelle crise sanitaire pourrait survenir n'a rien d'un cygne noir, genre d'événement rare et extraordinaire qu'on repousse aux calendes grecques. Personne n'oublie en effet la pandémie de Covid-19 qui a tué plus de 20 millions d'humains, même si début mai a été annoncée sa *« fin en tant qu'urgence de santé publique de portée internationale »* par l'Organisation mondiale de la santé.

Perles rares. Sauf qu'il faut aujourd'hui éviter l'écueil du rhinocéros gris — l'événement qui va forcément arriver mais auquel personne ne prête attention. L'une des menaces a pour nom superbactéries. Résistantes aux antibiotiques, elles ont fait plus de trois millions de malades en 2019. Heureusement, des équipes de recherche fondamentale s'efforcent de dénicher des perles rares thérapeutiques. Des médicaments inédits. Leur nouveau regard sur la nature est ici bienvenu.

L'enfer des dorsales océaniques. Merci l'évolution. Depuis des centaines de millions d'années, vertébrés et invertébrés développent des mécanismes adaptatifs qui peuvent se révéler d'un intérêt capital. Hasard d'un examen d'écologie, une surprise se cachait chez le ver de Pompéi, découvert en 1980 par l'océanographe Lucien Laubier dans l'enfer brûlant des cheminées hydrothermales sur les dorsales océaniques, comme l'a raconté Aurélie Tasiemski de l'Institut Pasteur de Lille.

Essais cliniques en vue. L'*Alvinella pompejana* arbore sur son petit corps un antibiotique. L'alvinellacine, désormais brevetée, tue les bactéries dites à gram négatif, un grand groupe dont les deux tiers nous posent problème, à nous humains. Mieux, elle n'engendre pas de résistance, sauf très rares mutants. On croise les doigts pour qu'un jour aient lieu des essais cliniques concluants.

Dans l'estomac du manchot royal. Outre la persévérance des scientifiques, il y faudra les indispensables ressources financières. Un souhait partagé par l'académicien Yvon Le Maho, organisateur de cette après-midi spéciale. Avec Philippe Bulet, directeur de recherche au CNRS, il voit dans l'estomac du manchot royal une véritable usine à antibiotiques, où sont préservées les proies ingérées puis régurgitées pour nourrir le poussin. Seulement voilà, si accéder aux expériences que fait la nature dans les abysses ou en Antarctique n'est déjà pas de tout repos, les lire puis développer un médicament tient aussi du parcours du combattant. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à :
courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr

Voie lactée, son nouveau visage se dessine
(Sciences et Avenir–La Recherche, n° 915, mai 2023)

Dans votre article sur le nouveau visage de la Voie lactée, vous écrivez page 34 que la fusion avec Andromède est inévitable car elle se déplace à la vitesse de 42 km/s vers l'est et 59 km/s vers le sud. Sur Terre, je situe bien l'est et le sud mais dans l'espace c'est pour le moins étrange. Où se trouvent donc le sud et l'est dans l'espace et par rapport à quoi ?

Régis Bouffard

S. et A.: Plusieurs systèmes de coordonnées sont utilisés en astronomie. Le plus simple est le système de coordonnées dites horizontales ou azimutales, dont le plan référence correspond à celui de l'horizon. L'étoile Polaire fournit la position du pôle nord céleste. En abaissant une ligne à partir de ce pôle sur l'horizon le plus proche, on détermine le point cardinal nord, les trois autres (sud, est, ouest) étant déduits à partir de celui-ci. L'azimut d'un objet céleste s'établit alors par la distance angulaire, sur le plan horizontal, au point cardinal sud (entre 0 et 360°). Et sa hauteur, par sa distance angulaire à l'horizon (entre 0 et 90°).

Polygones de sel

C'est surprenant de lire que l'énigme des polygones de sel (*S. et A.* n° 915, mai 2023, p. 14) vient d'être résolue. Il semblerait au contraire que cet aspect en forme de structure de nid-d'abeilles soit bien connu des géologues. On peut lire dans le *Guide géologique du Cantal*, édité par le Bureau de recherches géologiques et minières en 2017 (p. 76), sous la plume de Sébastien Leibrandt, docteur en géologie de l'université Paris-Sud : *« La forme hexagonale est la forme qui, dans la nature, demande le moins d'énergie à être fabriquée. Prenons l'exemple des fentes de dessication, nom scientifique pour désigner le phénomène de contraction de la boue qui sèche dans une mare ou une flaque d'eau. Il en résulte des formes hexagonales qui, comme pour les coulées de lave, demandent le moins d'énergie pour se fabriquer.* » Peut-on dès lors écrire que *« la formation des polygones à la surface des déserts de sel sur d'anciens lacs asséchés vient enfin de trouver une explication* » ?

Alain Rivière

S. et A.: Plusieurs mécanismes avaient été proposés, dès le début des années 1960, pour expliquer ces formes géométriques dans les déserts de sel. Mais aucun ne rendait compte, jusqu'à présent, de l'ensemble des paramètres, notamment la taille des polygones, qui mesurent toujours entre 1 et 2 mètres de diamètre, quelles que soient la région ou la quantité de sel.

Vertueuse méthanisation ?

Je souhaite faire un complément à la réponse que vous avez faite sur la méthanisation dans le numéro 913 du mois de mars. Vous déclarez que *« la méthanisation permet de récupérer le méthane produit par la dégradation du lisier/fumier et des déchets verts… »* Ceci est vrai pour les très petites unités de méthanisation. Pour la plupart comme dans l'Aube où j'habite, les méthaniseurs sont alimentés uniquement avec des céréales cultivées pour cet effet, et cela représente en moyenne une centaine d'hectares par unité. Vous concluez que le gaz naturel issu de la méthanisation est vertueux, ce n'est pas mon avis, car j'ai pu en discuter avec des agriculteurs qui donnent un coup de main lors des ensilages, lesquels me disaient avoir été chercher des céréales dans des champs à 40 km à la ronde, avec la pollution liée à la rotation des tracteurs et engins de tassement et qu'une de ces journées d'ensilage utilisait 6000 litres de fioul et ceci pendant plusieurs jours pour une grosse unité. Sachant que ces installations sont subventionnées à la construction et au rachat du gaz ou de l'électricité produite, je ne pense pas que ce soit aussi vertueux que vous le laissez entendre.

Michel Thiébaut

S. et A.: Selon le principe développé en France, la méthanisation ne peut pas provenir de plantes cultivées à cet effet, mais uniquement de déchets verts. C'est l'inverse de ce qui se pratique en Allemagne, ce qui explique d'ailleurs en partie le retard pris par la France dans ce secteur. Nous sommes donc très surpris de votre affirmation selon laquelle un méthaniseur ne serait alimenté que par des plantes cultivées.

Précision

Dans l'article sur la couleur des vitraux (*S. et A.* n° 914), la rose occidentale de la Sainte-Chapelle à Paris a été restaurée au XVe siècle sous le règne de Charles VIII (1483-1498) et non sous le règne de Charles III (898 à 922) comme indiqué par erreur.

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Vertigineux !

Des galaxies qui sont apparues à peine quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, soit il y a plus de 13 milliards d'années. Des planètes tout juste formées, observées de façon directe par la lumière qu'elles reflètent de leur étoile. Des grains de poussière recouverts de glace d'eau dans un nuage situé à 630 années-lumière de la Terre. Si les scientifiques se doutaient de ce que le plus grand télescope spatial jamais construit était susceptible de leur révéler, pour le simple amateur de science, la nature des premières observations dépasse l'entendement. Nous voici, après un an de service, à la fin de la première campagne d'observation du James-Webb Space Telescope (JWST). La moisson de résultats obtenue grâce à ce miroir de 25 m² placé à 1,5 million de kilomètres de nous est vertigineuse. Et ce n'est que le début ! Le bilan que nous vous proposons ce mois-ci n'est que le début d'une toute nouvelle histoire de l'exploration humaine. *« Cela m'évoque le temps des explorateurs qui parcouraient les mers pour explorer d'autres terres. Maintenant nous découvrons d'autres terres, mais elles sont extraterrestres »*, s'enthousiasme l'astrophysicien David Elbaz *(p. 40)*. Quelle chance avons-nous d'être aux premières loges ! De pouvoir lire le récit des meilleurs spécialistes qui décryptent pour *Sciences et Avenir-La Recherche* les secrets de ces images. Une nouvelle fois, les progrès de la science sont aussi rapides qu'importants. Ce mois-ci, vous découvrirez aussi que l'hydrogène est une source d'énergie qui est loin d'avoir dit son dernier mot, puisque les modes de production vertueuse se multiplient *(p. 42)*. Vous apprendrez que l'alternative aux pesticides est sans doute le contrôle de la nature par elle-même *(p. 54)*. Vous verrez comment les médecins ont identifié une maladie qui touche un homme sur 4000, principalement après 50 ans *(p 64)*. Vous serez étonnés par une nouvelle intelligence, dite organoïde, qui pourrait ouvrir la voie à des « bio-ordinateurs » à base de neurones vivants *(p. 50)*. Vous remonterez enfin dans le temps avec la mise au jour de pointes de flèche qui prouvent que nos ancêtres tiraient déjà à l'arc dans le sud de France il y a 54 000 ans, soit 40 000 ans plus tôt qu'on ne le pensait *(p. 76)* ! Une nouvelle fois, les trésors des explorateurs du savoir sont fascinants. ■ @mathieu_nowak

> « Nous vous proposons le début d'une toute nouvelle histoire de l'exploration humaine »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD,
Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs SYLVIE BENZONI, Christophe CASSOU,
Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, N. DURBECQ,
P. KALDY, N. C. GUTTIEREZ, E. TISSANDIÉ, F. ROUX
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAEGEL - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOUIN directrice numérique déléguée -
Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

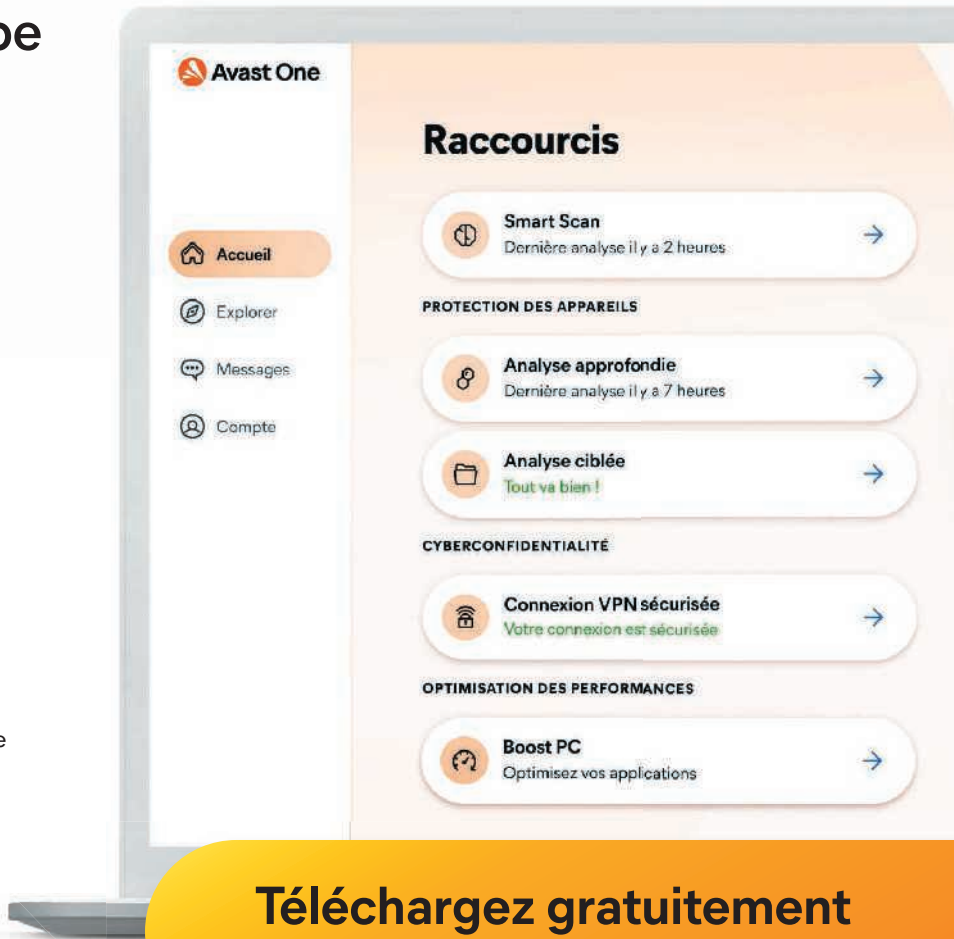
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un encart « montre automatique -Vuillemin Regnier-Sophia Boutique », un message « First Voyages » ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Bien plus qu'un simple antivirus

Avast One regroupe protection, confidentialité et performances.

- Bloquez virus, malwares, logiciels espions et ransomwares
- Sécurisez vos achats et transactions bancaires sur Internet
- Recevez une alerte en cas de piratage de vos comptes web
- Protégez-vous des attaques par phishing et des sites d'arnaques
- Sécurisez votre connexion et protégez votre argent avec un VPN
- Dissimulez votre position géographique
- Masquez votre adresse IP pour une confidentialité 24h/24 et 7j/7
- Accélérez, nettoyez et optimisez vos appareils



Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

N'oubliez pas de protéger votre smartphone.
Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

Presse citron — Meilleur antivirus ★★★★★

01NET — Suite hyper complète ★★★★

PC EDITORS' CHOICE PCMAG.COM — Choix de la rédaction ★★★★½

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 916 / Juin 2023

DOSSIER P. 26

Une nouvelle histoire de l'Univers

Le télescope spatial James-Webb enchaîne les découvertes depuis son lancement fin 2021. Il dévoile les plus anciennes galaxies jamais observées et éclaire les conditions de formation des étoiles et des planètes. La moisson d'exoplanètes s'annonce aussi exceptionnelle.

P. 42

La révolution annoncée de l'hydrogène vert

La France et l'Europe misent sur le développement d'une filière d'hydrogène « vert » issu de l'éolien, du solaire et de l'hydraulique. L'enjeu : transformer les secteurs de l'industrie et des transports.

P. 64

Le syndrome Vexas, maladie insaisissable

Identifiée en 2020, cette pathologie atteint surtout les hommes de plus de 50 ans, avec une espérance de vie médiane d'environ dix ans. Pour le moment, la médecine avance à tâtons. Enquête.

P. 76

Révélations sur l'arrivée des premiers archers en Europe

La découverte de pointes de flèche dans la grotte Mandrin (Drôme) confirme la venue d'« Homo sapiens » sur le continent européen 9000 ans plus tôt qu'on ne l'a longtemps pensé.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** Un trou noir en fuite sèmerait des étoiles / Un minéral inédit dans un fossile de foudre

42 **Hydrogène vert : révolution annoncée dans l'industrie et les transports**

50 **Vers des ordinateurs dopés aux neurones vivants**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Il y a de la vie sur le continent de plastique / Les spirales du sommeil des éléphants de mer

54 **Biocontrôle : l'alternative aux pesticides est dans la nature**

60 **De fascinants animaux indestructibles**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** La pratique musicale freine le déclin cognitif / Ces verres ralentissent la myopie

64 **Syndrome Vexas : le défi d'une nouvelle maladie insaisissable**

70 **Une avancée majeure pour retarder le diabète**

74 **Nutrition : le bio, encore de bonnes raisons de l'adopter**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** 210 sépultures mises au jour à Saint-Denis / L'origine des chevaux des plaines américaines

76 **Les premiers archers : révélations sur l'arrivée d'« Homo sapiens » en Europe**

82 **Codex Sassoon, la vente du siècle**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel de juin**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Solutions des jeux**

98 **Jeux**

NASA, ESA, CSA, AND STSCI. IMAGE PROCESSING: J. DEPASQUALE, A. PAGAN, AND A. KOEKEMOER (STSCI) - FRANK RUMPENHORST/DPA/ABC/ANDIA.FR - BSIP - LUDOVIC SLIMAK

Explorez en croisière l'un des fleuves les plus mythiques et les plus imposants d'Asie : le **Mékong**. À travers le **Laos** et la **Thaïlande** ou le **Vietnam** et le **Cambodge**, vous profiterez de multiples conférences dispensées par nos prestigieux et passionnés intervenants tels que **Franck Ferrand**, **Chantal Forest** ou **Pascal Boniface**.

*Prix incluant une remise de 400€/pers. pour toute réservation avant le 30 juin 2023. CGV disponibles sur notre site.

La carte ci-contre correspond à l'itinéraire de janvier 2024. Photos : ©AdobeStock ©BassacPandaw

CROISIÈRES SUR LE MÉKONG

par Voyages d'exception

PLUSIEURS DÉPARTS :
NOV. 2023 • JANV. 2024 • FÉV. 2024

Dès **5 390 €**/pers.*

Réservations et informations
Demandez notre brochure détaillée au **01 75 77 87 48**, par e-mail à **contact@voyages-exception.fr**, sur **voyages-exception.fr/brochures** (code MEKSC à renseigner), ou contactez votre agence de voyages.

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

VOYAGES-EXCEPTION.FR

Expulsé de sa galaxie à 1600 km/s, le trou noir supermassif pourrait laisser dans son sillage des étoiles en formation (vue d'artiste).

NASA, ESA, LEAH HUSTAK (STSCI)

Un trou noir en fuite sèmerait des étoiles

C'est l'une des hypothèses pour expliquer une longue traînée dans l'espace.

Elle balafre l'espace sur près de 200 000 années-lumière (deux fois le diamètre de la Voie lactée !) : cette immense traîne blanchâtre intrigue les astrophysiciens. Faiblement lumineuse, elle a été repérée par l'équipe de Pieter van Dokkum, de l'université Yale (États-Unis), grâce au télescope spatial Hubble, puis confirmée par l'observatoire Keck (Hawaii). Elle semble s'étirer depuis une galaxie compacte située à 7,6 milliards d'années-lumière de nous. *« Nous n'avions jamais rien vu de pareil dans l'Univers »*, a déclaré le chercheur sur le site du Keck. Et l'hypothèse qu'il propose dans *The Astrophysical Journal Letters* a de quoi enflammer l'imagination : il s'agirait des conséquences d'un trou noir supermassif éjecté de sa galaxie à 1600 km/s. *« Ce que nous voyons est un sillage derrière le trou noir, comme celui engendré par un navire, où le gaz se refroidit et peut former des étoiles »*, détaille Pieter von Dokkum. Traversant une zone riche en gaz, l'astre ferait naître par son interaction avec la matière toute une flopée d'étoiles derrière lui : 3 milliards de masses solaires en tout, en 39 millions d'années de voyage.

Le James-Webb appelé à départager les théories

Cette interprétation s'appuie sur des éléments théoriques. *« Nous savions depuis longtemps qu'il existe des trous noirs supermassifs, et l'on prévoyait depuis une cinquantaine d'années qu'ils pourraient parfois être éjectés des galaxies. »* Cette éjection se produirait par exemple lors de la fusion de deux galaxies dotées de trous noirs supermassifs en leur centre. Si un troisième trou noir vient à passer, une valse monstrueuse s'engagerait entre les astres, s'achevant par l'expulsion d'un voire des trois danseurs. À l'appui de sa théorie, l'équipe de Pieter Van Dokkum note que la galaxie d'où jaillit la trace semble justement dépourvue de trou noir. Les chercheurs ont aussi repéré un point brillant entouré de gaz à la pointe de la traînée, qui serait le fameux astre en fuite. Mais trois semaines à peine après cette publication, l'équipe du professeur Jorge Almeida, de l'Institut d'astrophysique des Canaries (Espagne), a proposé une autre interprétation dans la revue *Astronomy & Astrophysics*. Tout en reconnaissant que l'idée de Pieter Van Dokkum est *« d'un grand intérêt »*, il voit plutôt cette traînée comme une galaxie sans bulbe, donc très plate, et vue précisément par la tranche. Une galaxie de ce type a déjà été observée et cataloguée sous le nom de IC 5249. Afin de départager les deux hypothèses, le télescope spatial James-Webb a d'ores et déjà été appelé à la rescousse et l'étrange traînée devrait bientôt figurer à son menu. **F. N.**

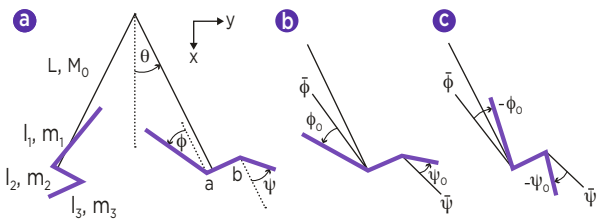
Le balancement optimal mis en équation

PHYSIQUE En ajustant la position de leur corps, les enfants apprennent vite à utiliser une balançoire de façon optimale ; un savoir empirique qui, pour la première fois, a été mis en équation, modélisé et expérimenté. Les scientifiques ont décrit la balançoire par trois segments : le siège, fixe, le torse et les jambes des usagers, mobiles. Quand les balancements débutent, la meilleure stratégie est d'allonger les jambes et se pencher en arrière au moment où le siège passe sous le portique vers l'avant. À mesure que l'amplitude augmente, l'optimum se déplace vers l'arrière : pour aller au plus haut, il faut alors étendre le corps juste avant que la balançoire reparte vers l'avant. **F. D.**

SOURCE : CHIAKI HIRATA, UNIVERSITÉ JUMONJI, JAPON.

PLAINPICTURE - C. HIRATA

La formule mathématique décrit la balançoire comme la masse d'un pendule articulé en trois segments : le siège fixe, le torse et les jambes.



IL A DIT

« La planète a probablement existé de façon stable pendant des milliards d'années avant que son étoile gonfle jusqu'à l'engloutir en une poignée d'orbites »

Morgan McLeod, chercheur à l'université Harvard (États-Unis) dont l'équipe vient de publier la première observation d'une planète avalée par son étoile à 12 000 années-lumière de la Terre. **H. J.**

Trajectoire parfaite pour la mission Juice

ASTROPHYSIQUE Le lancement de la mission Juice *(lire* S. et A. *n° 914, p. 12)* en direction des lunes glacées de Jupiter a été si bien réussi par la fusée Ariane 5 que la sonde n'aura pas de correction de trajectoire à effectuer. L'énergie économisée par la précision du tir devrait permettre de prolonger la mission au-delà de la date prévue au départ : 2034. **H. J.**

MATTHEW PASEK

La matière foudroyée **était entourée de sphérules métalliques.**

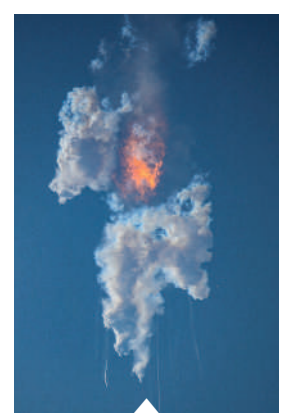
Un minéral inédit dans un fossile de foudre

Constitué de calcium, d'hydrogène, de phosphore et d'oxygène, il a été découvert dans une fulgurite.

« *Des minéraux similaires avaient déjà été observés dans des météorites et dans l'espace, mais nulle part encore sur notre planète* », explique Matthew Pasek, géologue à l'université de Floride du Sud (États-Unis), dont l'équipe a mis la main sur un minéral inconnu sur Terre. Il est constitué de calcium, d'hydrogène, de phosphore et d'oxygène ($CaHPO_3$). Il a été découvert au sein d'une fulgurite, des structures tubulaires qui se forment lorsque la foudre frappe le sol ; l'énergie libérée à ce moment peut en effet faire fondre et vitrifier des mélanges de silice, de roches et de matières organiques pour former ces « fossiles de foudre ». En l'occurrence, les fulgurites étudiées se sont créées lors d'un orage en 2012 sur la côte ouest de la Floride. Elles étaient entourées de sphérules métalliques mesurant entre 0,5 et 1,1 cm de diamètre dans lesquelles a été détecté le minéral. Jusqu'ici, *« les expériences pour le recréer en laboratoire ont échoué, ce qui indique que le matériau se forme sans doute très rapidement et dans des conditions très précises »* qui ne sont pas encore caractérisées, préviennent les chercheurs. **F. D.**

La drôle de réussite de Starship

AÉROSPATIAL Le premier vol d'essai orbital de Starship, la fusée géante de SpaceX, s'est soldé par un échec le 20 avril. Si le lanceur de 120 mètres de haut s'est élevé à une altitude de 39 kilomètres, il a dû s'autodétruire 4 min et 2 s après le décollage sans pouvoir atteindre l'orbite basse. Surtout, le pas de tir a été partiellement détruit par la puissance des moteurs, expulsant débris métalliques et morceaux de béton alentour, jusque sur des habitats d'espèces protégées. Pour la société d'Elon Musk toutefois, le décollage est en soi une réussite. **H. J.**



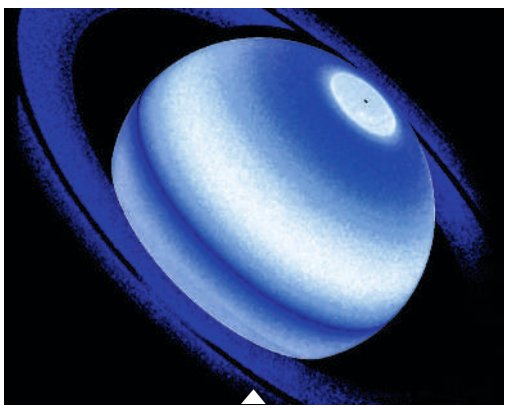
P. T. FALLON / AFP

Le lanceur s'est autodétruit 4 min et 2 s après le décollage.

Des météorites réchauffent l'atmosphère de Saturne

Des morceaux de glaces d'eau et de poussières se détachant des anneaux expliquent ce phénomène.

Les indices étaient là, sous les yeux des astronomes, collectés par une série de sondes spatiales depuis plusieurs dizaines d'années. Mais il a fallu la sagacité d'une équipe dirigée par Lotfi Ben-Jaffel, chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris, pour assembler toutes les pièces du puzzle et mettre en évidence un processus inédit concernant les anneaux de Saturne. Ces immenses structures s'étendent sur des centaines de milliers de kilomètres de diamètre et rendent cette planète reconnaissable entre toutes. Une fraction de ces disques composés d'innombrables morceaux de glaces d'eau et de poussières est attirée par la force gravitationnelle de la géante gazeuse. Les particules tombent ainsi en cascade sur Saturne, produisant notamment des collisions et forces de frictions qui réchauffent son atmosphère à haute altitude. Un phénomène qui explique les anomalies thermiques parfois constatées par le biais de rayons UV jusqu'ici inexpliqués. Inédit dans le Système solaire, le processus pourrait servir à repérer la présence d'anneaux sur des planètes beaucoup plus lointaines. **F. D.**



NASA / ESA / LOTFI BEN-JAFFEL, IAP & LPL.

Cette image composite de Saturne montre un excès d'émissions ultraviolettes (zone blanche) sur une bande d'environ 30° de latitude, au-dessus des anneaux.

À VOIR SUR LE NET

DARPA

La Darpa dévoile son buggy tout-terrain autonome

TRANSPORTS La Darpa, l'agence de recherche de la défense américaine, a testé pour la première fois son Racer, un buggy tout-terrain autonome, dans le désert des Mojaves. Sans aucun humain à bord, à travers des pistes de terre, bosses et crevasses, il a réalisé des parcours de 6 à 18 km, atteignant des pointes à 40 km/h, avec pour seules indications d'itinéraire ses points de départ et d'arrivée. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Mars posséderait un noyau liquide

GÉOLOGIE Grâce au sismomètre français SEIS qui a opéré sur la planète Rouge de 2018 à 2022, une équipe internationale a pu détecter et analyser des ondes sismiques qui ont traversé de part en part la planète en passant par son noyau. Elles indiquent que celui-ci serait entièrement liquide et beaucoup moins dense que le noyau de la Terre. **F. D.**

SOURCE : JESSICA IRVING, UNIVERSITÉ DE BRISTOL, ROYAUME-UNI.

Une photo générée par IA crée le malaise

BORIS ELDAGSEN

Le portrait a été créé par le programme DALL-E. 2.

ALGORITHMES Lauréat du Sony World Photography Award en mars, le photographe allemand Boris Eldagsen a refusé son prix. Motif ? Son œuvre, un portrait énigmatique de deux femmes intitulé *Pseudomnesia : the electrician*, a été créée intégralement par intelligence artificielle (IA), contrairement à ce qu'il avait assuré au jury. Celui-ci estime avoir été trompé. L'artiste argue, lui, qu'il souhaitait montrer à quel point ce type de concours était peu préparé à la déferlante de l'IA générative. **A. D.**

L'origine des quasars élucidée

ASTROPHYSIQUE Parmi les objets les plus lumineux de l'Univers à l'énergie colossale, les quasars résulteraient bien de la collision de deux galaxies. C'est ce que révèle une équipe internationale d'astronomes qui affirme avoir trouvé une preuve robuste de cette théorie en comparant 48 galaxies avec quasars à une centaine d'autres n'en possédant pas. Selon les résultats, les galaxies hôtes de quasars étaient trois fois plus susceptibles que les autres d'avoir été en collision. **H. J.**

SOURCE : JONATHON PIERCE, UNIVERSITÉ D'HERTFORDSHIRE, ROYAUME-UNI.

candia

On n'a jamais fini de grandir

OUVRIR CETTE BRIQUE DE LAIT AIDE LES JEUNES À OUVRIR DES FERMES.

Aujourd'hui en France, 42 % des éleveurs laitiers ont plus de 50 ans*.
C'est pourquoi Candia et la coopérative dont elle fait partie s'engagent pour assurer la relève et contribuer à pérenniser la filière laitière française. Chaque année, 200 jeunes agriculteurs reçoivent ainsi une aide pouvant aller jusqu'à 10 000 € pour se former et s'équiper.

Depuis son lancement cette brique de lait a permis de collecter plus de 150 000 €.
Merci à vous !

Pour en savoir plus, rendez-vous sur www.candia.fr/jeunes-agriculteurs

coopérative d'éleveurs** depuis 1971

CANDIA SAS - 352 014 955 RCS PARIS - 200 216 rue Raymond Losserand 75014 Paris - 80 540 557 € - AVRIL 2023.

* Source : France Terre de Lait 2021
** Candia appartient à une coopérative d'éleveurs depuis 1971.

THE OCEAN CLEANUP, SMITHSONIAN INSTITUTION

Des hydroïdes à gousses côtières et des balanes à col de cygne ont colonisé des déchets plastiques.

Il y a de la vie sur le continent de plastique

Des dizaines d'espèces d'invertébrés vivant normalement dans les eaux côtières ont été identifiées au cœur de l'océan Pacifique.

L'analyse d'échantillons de plastiques collectés dans la grande zone d'ordures de l'océan Pacifique, aussi appelée septième continent ou continent de plastique, révèle une colonisation par un nombre surprenant d'espèces d'invertébrés marins côtiers. Un écosystème troublant pour ce vortex de déchets, microscopiques pour la plupart, qui s'agglutinent en plusieurs endroits et flottent un peu sous la surface entre la Californie et Hawaii. « *Notre découverte suggère que les frontières biogéographiques passées entre les écosystèmes marins — établies depuis des millions d'années — changent rapidement en raison de la pollution plastique flottante qui s'accumule dans les gyres subtropicaux* », constate ainsi Linsey Haram, écologue au Centre de recherche de l'environnement de la Smithsonian Institution (États-Unis) et première auteure de l'étude parue dans *Nature Ecology & Evolution*.

Anémones, coquillages et crustacés

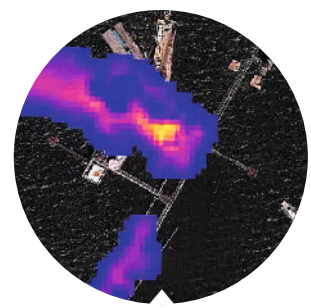
L'équipe a identifié 37 espèces d'invertébrés vivant normalement dans les eaux côtières, notamment des coquillages, des crustacés, des anémones de mer et des mousses appelées bryozoaires. Les résultats suggèrent que ces organismes côtiers sont capables de se reproduire, de croître et de persister en haute mer, créant une communauté qui n'existait pas auparavant.

Mais la prolifération a de quoi inquiéter l'archipel hawaiien voisin au nord-est de la zone de déchets du Pacifique Nord. Car les débris qui se détachent constituent la majorité de ceux qui arrivent sur ses plages et les récifs. « *Par le passé, les écosystèmes marins fragiles des îles étaient protégés par leur éloignement des côtes d'Asie et d'Amérique du Nord. La présence de ces espèces dans le gyre du Pacifique Nord indique que les îles courent un risque accru de colonisation par des espèces envahissantes* », alerte Nikolai Maximenko, coauteur de l'étude à l'université d'Hawaii (États-Unis). **H. J.**

Le golfe du Mexique relâche du méthane

POLLUTION Le plus grand bassin américain de production *offshore* de combustibles fossiles a un impact sur le réchauffement climatique deux fois plus important qu'estimé. C'est ce que révèle la première mesure des émissions de gaz à effet de serre au-dessus du golfe du Mexique : les anciennes plateformes en eaux peu profondes se comportent comme des super-émetteurs de méthane, dont l'impact sur l'effet de serre est environ 25 fois supérieur à celui du CO_2. **P. K.**

SOURCE : ALAN GORCHOV NEGRON, UNIVERSITÉ DU MICHIGAN, ÉTATS-UNIS.



CARBONMAPPER

Du méthane s'échappe d'une installation offshore dans le golfe du Mexique.

Une météo des forêts contre les incendies

ENVIRONNEMENT Une nouvelle « météo des forêts » alertant sur le risque de départ d'incendies sera diffusée par Météo France quotidiennement à partir du 1er juin. Les prévisions seront établies avec l'Office national des forêts (ONF), à partir de données sur la sécheresse de la végétation, combinées à l'Indice forêt météo (IFM) qui mesure la propension des feux à se propager selon différents paramètres (températures, vent, humidité…). **H. J.**

Les spirales du sommeil des éléphants de mer

Grâce à des casques d'électroencéphalographie, des chercheurs ont pu analyser l'activité du cerveau de ces mammifères marins.

Pendant leurs sept mois de saison de chasse, les éléphants de mer parcourent jusqu'à 10 000 kilomètres dans l'océan en ne dormant que… deux heures par jour en moyenne. Et encore, pas plus de trente minutes consécutives. C'est ce que montre une étude publiée dans *Science*.
Les chercheurs ont enregistré l'activité cérébrale — et donc les rythmes de sommeil — de ces mammifères de la famille des Pinnipèdes, grâce à des casques EEG mesurant l'activité électrique du cerveau. Pour minimiser le risque de prédation, les éléphants de mer limitent le temps passé à la surface (environ deux minutes entre des plongées de dix à trente minutes). Lorsqu'ils entrent en phase de sommeil paradoxal, au cours de plongées profondes qui les mettent hors de portée des prédateurs, la paralysie du sommeil les fait se retourner sur eux-mêmes et dériver vers le fond dans une « spirale du sommeil ». *« Ce terme décrit la lente descente de l'éléphant de mer dans les profondeurs de l'océan, tout en tournant sur eux-mêmes »*, explique Jessie Kendall-Bar, de l'université de Californie de San Diego (États-Unis). **E. T.**

P. KOBEH/ NATUREPL/ EBPHOTO

Ce pinnipède ne dort que 2 heures par jour durant les sept mois qu'il passe dans l'eau. Le reste du temps à terre, il peut dormir jusqu'à 11 heures.

Le parfum assassin des plantes carnivores

BOTANIQUE Pour attirer les insectes dans leur urne, les sarracénies libèrent des odeurs adaptées à leurs proies, montre une étude française. Ces plantes carnivores d'Amérique du Nord font varier leurs composés odorants volatils pour charmer spécifiquement fourmis, mouches, abeilles ou papillons. Associées à la taille de leurs urnes, les odeurs permettent même de prédire le menu préféré de chaque espèce de ces plantes. **P. K.**

SOURCE : CORENTIN DUPONT, UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER, FRANCE.

M. DURHAM/ MINDEN PICTURES/ BIOSPHOTO

La sarracénie attire dans son urne les insectes avec des odeurs spécifiques.

Une expédition au chevet des cours d'eau européens

ÉCOLOGIE Un aventurier français, Christophe Gruault, a entamé le 1er mai à Varsovie (Pologne) un périple de 2023 km à bord d'un canot à rames qui l'amènera jusqu'à Paris en empruntant 22 cours d'eau à travers cinq pays : Pologne, Allemagne, Belgique Pays-Bas et France.
Sa mission : l'échantillonnage des rivières parcourues pour des prélèvements d'ADN environnemental, qui seront analysés par le Muséum national d'histoire naturelle de Paris. **H. J.**

IL A DIT

« Le développement d'El Niño conduira très probablement à un nouveau pic du réchauffement climatique et à faire tomber les records de température en 2023 et 2024 »

Petteri Taalas, secrétaire général de l'Organisation météorologique mondiale à l'ONU, a averti d'un probable nouvel épisode d'El Niño dans les prochains mois, phénomène climatique naturel cyclique qui conduit à une élévation temporaire des températures de l'océan Pacifique.

Le secret de l'hivernation de l'ours

ÉTHOLOGIE Presque immobile durant ses quatre mois d'hivernation, l'ours est pourtant protégé de la formation de caillots sanguins par la modulation d'une petite protéine plaquettaire, HSP47. C'est ce que montre une étude ayant comparé le sang d'ours actifs et en plein hivernage. Impliquée chez l'humain dans la formation de caillots, HSP47 disparaît en période d'inactivité des ursidés, les protégeant contre les thromboses veineuses. **P. K.**

SOURCE : M. THIENEL, HÔPITAL UNIVERSITAIRE DE MUNICH, ALLEMAGNE.

C. PHILIPPE/ALAMY/ PHOTOTAKE.COM

Impliquée dans la formation de caillots, la protéine HSP47 disparaît pendant l'inactivité.

Le clignement d'yeux est apparu chez les poissons

ICHTYOLOGIE Les premiers poissons à avoir tenté des incursions terrestres il y a 400 millions d'années étaient déjà équipés pour un clignement d'yeux rudimentaire. C'est ce que révèle une étude menée sur des *Oxudercinae*, une sous-famille de poissons amphibies aux yeux globuleux. Des enregistrements vidéo montrent qu'ils accomplissent cet exploit en rentrant leurs globes oculaires dans leur orbite afin de permettre à la peau de se refermer autour d'eux. **H. J.**

SOURCE : AHMAD OMAR, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.

DANIEL J. FIELD

Les « Oxudercinae » vivent en partie hors de l'eau dans les vasières d'Afrique et d'Asie.

À VOIR SUR LE NET

KAUFMANN ET AL.

Un éléphant apprend à peler ses bananes

ÉTHOLOGIE Pang Pha, éléphante d'Asie hébergée au zoo de Berlin (Allemagne), a surpris ses soigneurs en apprenant, seule, par l'observation des humains, à peler les bananes qu'elle juge trop mûres. Si elle avale les fruits verts entiers, en revanche, elle préfère les peler dès que des taches brunes apparaissent. Selon l'étude qui lui est consacrée, son geste est bien plus sûr et rapide que celui des humains. **A.-S. T.**

SOURCE : LENA KAUFMANN, UNIVERSITÉ DE BERLIN, ALLEMAGNE.

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Les superfibres du concombre de mer

MALACOLOGIE À l'aide d'analyses génétiques et de microscopie électronique, une équipe a détaillé la constitution des fibres que projette le concombre de mer lorsqu'il est menacé. L'entrelacs de fils blancs très collants qui emprisonnent ses assaillants est constitué de longues chaînes protéiques similaires à celles des soies du ver ou des araignées. **H. R.**

SOURCE : TING CHEN, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES, CHINE.

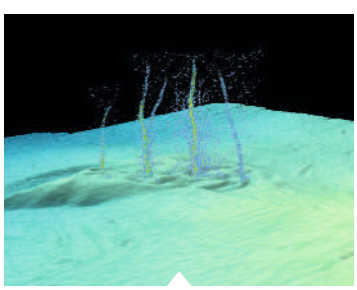
BIOSPHOTO

L'holotorie projette des fibres pour se protéger.

Un liquide s'échappe du fond de l'océan

L'étrange fuite pourrait réguler la tension de la faille sismique de Cascadia qui menace la côte ouest des États-Unis.

Jaillissant du fond océanique, un fluide chaud à haute pression, essentiellement composé d'eau, a été découvert à environ 80 km au large de Newport dans l'Oregon (États-Unis). *« C'est quelque chose qui à notre connaissance n'a jamais été observé auparavant »*, a déclaré Evan Solomon, professeur de géologie marine à l'université de Washington. Le fluide, d'une température de 9 °C au-dessus de celle de la mer, proviendrait de la zone de subduction de Cascadia, zone sismique chauffée entre 150 °C et 250 °C. Les chercheurs y voient le signe d'une libération de pression permettant aux plaques tectoniques de glisser sans accumuler de contraintes.



PHILIPET AL.

Le fluide chaud provient d'un trou au fond du Pacifique (image sonar).

Baptisé Pythias Oasis, le site pourrait servir de baromètre pour évaluer le niveau de pression dans cette zone susceptible de déclencher un mégaséisme de magnitude 9 dans les décennies ou siècles prochains *(lire* S. et A. *n° 855, mai 2018)*. **H. J.**

Des bactéries aptes au recyclage du plastique

MICROBIOLOGIE

Des organismes microbiens vivant dans les sols alpins et arctiques se sont montrés capables de digérer les plastiques à 15 °C. Ils pourraient être utilisés dans une chaîne de recyclage, contrairement à d'autres bactéries qui, elles, ne sont pas efficaces en dessous de 30 °C, entraînant un coût énergétique et environnemental.

H. J.

SOURCE : JOEL RÜTHI, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE ZURICH, SUISSE.

bouygues TELECOM

BETC Bouygues Telecom – Société anonyme au capital de 1 929 207 595,48 € – Siège social : 37-39, rue Boissière – 75116 PARIS – 397 480 930 RCS PARIS.

On est souvent à un clic d'une arnaque.

Heureusement, avec les Solutions Sécurité Smartphone incluses dans tous nos forfaits Bouygues Telecom, nous vous aidons à protéger vos données personnelles et vos usages mobiles face aux messages frauduleux et aux tentatives de piratage.

solutions sécurité smartphone
norton

en boutique | bouyguestelecom.fr

Offres soumises à conditions. Service Norton inclus pendant 24 mois à compter de la souscription à un forfait Bouygues Telecom avec engagement 12 ou 24 mois.

RAPIDEYE/GETTY IMAGES

Les personnes apprenant le piano ont vu leurs performances cognitives améliorées de 6 % en moyenne.

La pratique musicale freine le déclin cognitif

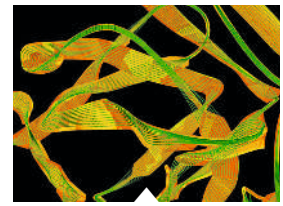
Des chercheurs ont observé une augmentation de la matière grise chez les personnes âgées jouant d'un instrument.

L'écoute active et, plus encore, la pratique d'un instrument de musique ont un effet bénéfique mesurable pour ralentir le déclin cognitif chez les personnes âgées et retarder l'apparition des démences séniles. C'est ce que montre une étude publiée dans *Neuroimage : report*s. Une équipe de l'université de Genève (Suisse) a étudié les effets de la musique sur le cerveau de 132 participants âgés de 62 à 78 ans qu'ils ont divisés en deux groupes : les premiers apprenaient le piano, les seconds pratiquaient l'écoute musicale active ; tous recevaient un cours hebdomadaire d'une heure complété par des entraînements personnels, 5 jours sur 7, pendant un an. Après seulement six mois d'étude, les résultats s'avèrent déjà significatifs puisque les chercheurs ont pu observer à l'imagerie par résonance magnétique (IRM) une augmentation de la matière grise dans quatre régions du cerveau : le noyau caudé gauche, l'opercule rolandique droit et les cervelets gauche et droit. Cette augmentation est corrélée à une amélioration des performances cognitives aux tests de 6 % en moyenne, preuve d'un bénéfice réel notamment sur la mémoire de travail — qui sert à retenir les informations quelques secondes pour réaliser une tâche.

Du côté du cortex auditif primaire, région particulièrement affectée par le vieillissement, le volume de matière grise s'est stabilisé chez les joueurs de piano, là où il a diminué dans le groupe d'écoute active. *« Jouer d'un instrument aura des effets supérieurs, car c'est une activité qui stimule plus de domaines cognitifs »*, explique Damien Marie, premier auteur de l'étude.

Vivre plus longtemps en bonne santé

Il n'est donc pas question que la musique rajeunisse le cerveau, mais plutôt qu'elle permette de vivre plus longtemps en bonne santé. *« L'atrophie cérébrale est un processus inexorable associé au vieillissement. On peut seulement espérer la bloquer ou la freiner dans les régions stimulées par l'apprentissage »*, précise le chercheur. Et pour cela, il n'est jamais trop tard : pratiquer des activités stimulantes est bénéfique, peu importe son âge. **N. D.**



ALFRED PASIEKA/SPL/SUCRE SALE

Le traitement cible la protéine antithrombine (modélisation).

Un ARN efficace contre l'hémophilie

HÉMATOLOGIE Deux essais de phase 3 montrent que le fitusiran développé par l'entreprise pharmaceutique française Sanofi est efficace en injections mensuelles sous-cutanées pour prévenir l'hémophilie sévère A et B. Il s'agit du premier ARN développé contre cette maladie génétique caractérisée par des saignements excessifs par défaut de coagulation. Il agit en interférant avec la production d'une protéine, l'antithrombine, pour améliorer la capacité à coaguler. **H. J.**

Un inventaire des médicaments disponibles

PHARMACOLOGIE Paracétamol, amoxicilline, miséprostol… Le cap des 3500 molécules à risque de rupture de stock a été franchi en 2022 — contre 2160 en 2021. Pour suivre la situation, l'Agence nationale de sécurité des médicaments et des produits de santé (ANSM) lance une plateforme (data.ansm.sante.fr) à destination du grand public et des professionnels. **S. R.-M.**

Première opération du cerveau « in utero »

AMERICAN HEART ASSOCIATION

Le fœtus était âgé de 34 semaines.

CHIRURGIE Une équipe de l'hôpital pour enfants de Boston (États-Unis) a annoncé le succès de la première chirurgie cérébrale au monde réalisée *in utero*, sur un fœtus de 34 semaines. Une manœuvre délicate qui a vu les chirurgiens réparer un vaisseau sanguin mal formé dans le cerveau en introduisant un microcathéter à travers le crâne du bébé. Né deux jours plus tard, l'enfant se portait toujours *« remarquablement bien »* après six semaines selon ses médecins. **N. D.**

Ces verres ralentissent la myopie

Leur port douze heures par jour par les enfants ralentirait la progression de ce trouble visuel de 60 % par rapport aux verres classiques.

Une preuve supplémentaire de l'efficacité des verres dits de freination visant à ralentir l'évolution de la myopie *(lire* S. et A. *n° 903)* dès l'enfance vient d'être apportée par une étude dans la revue *Scientific Reports*. Elle a suivi pendant six ans une cohorte de jeunes Asiatiques avec des verres type MiYosmart fabriqués par Hoya. Bilan : leur port douze heures par jour ralentit de 60 % en moyenne la progression du trouble visuel par rapport aux verres classiques et il n'y a pas d'effet rebond à l'arrêt de ces verres. Commercialisés depuis deux ans en France, ils sont équipés d'une constellation de microlentilles destinées à corriger l'hypermétropie périphérique, caractéristique de l'œil myope « trop long ». Un outil d'avenir alors que les données de prévalence de la myopie sont inquiétantes : 20 % de la population mondiale était concernée en 1970 contre 40 % aujourd'hui, soit 2,6 milliards de personnes. Un chiffre qui pourrait bondir à 5 milliards d'ici à 2050 selon des projections récentes. **S. R.-M.**

PEAKSTOCK/SPL/LDA/AFP - HOYA

La zone centrale du verre corrige la myopie. Autour, des segments de défocalisation contrôlent la progression du trouble.

Ces « virus étonnants » qui nous rapprochent du plancton

VIROLOGIE Point commun entre l'espèce humaine et le plancton ? Tous deux sont massivement infectés par des virus apparentés : l'herpès pour l'humain, et pour le plancton, une famille de virus tout juste découverte. Ces mirusvirus — littéralement « virus étonnants » — abondent de l'équateur jusqu'aux Pôles et pourraient avoir un ancêtre commun avec l'herpès, révèle une étude française. **C. G.**

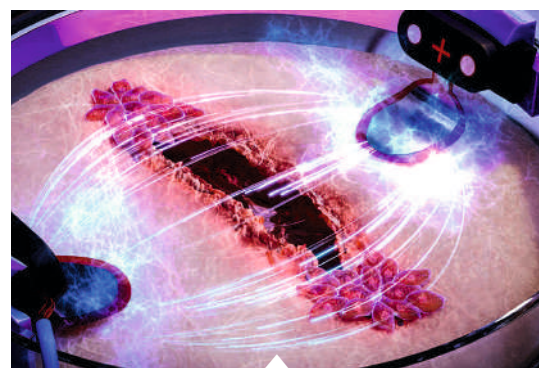
SOURCE : MORGAN GAÏA, UNIVERSITÉ PARIS-SACLAY, FRANCE.

30 %

La part de leucémiques en rémission avec un nouveau traitement

ONCOLOGIE **Un tiers des patients atteints de leucémie myéloïde aiguë, un cancer du sang de mauvais pronostic, sont entrés en rémission après avoir pris durant deux mois un comprimé de révuménib. Cet inhibiteur cible une voie de signalisation défectueuse dans les cellules cancéreuses. L'essai clinique de phase 1 a porté sur 68 patients.** **P. K.**

SOURCE : GHAYAS ISSA, CENTRE CANCER ANDERSON, ÉTATS-UNIS.



SCIENCE BRUSH, HASSAN A. TAHINI

Représentation d'une plaie « in vitro » traitée par impulsions électriques.

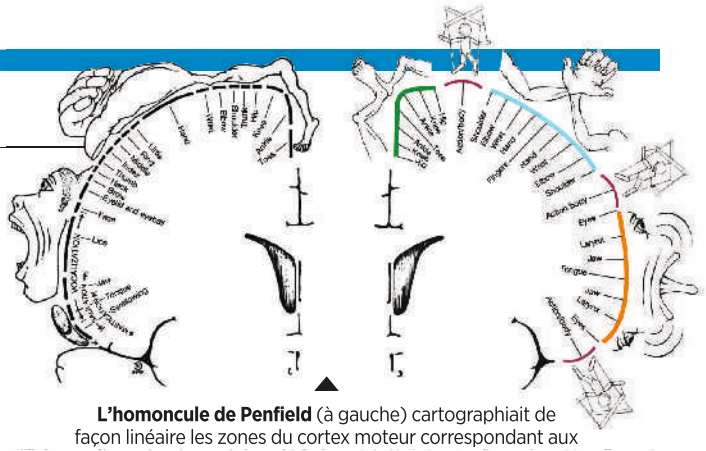
L'électricité accélère la cicatrisation des plaies

DERMATOLOGIE Contre les plaies chroniques qui touchent notamment les personnes diabétiques, une équipe montre, sur des peaux cultivées en laboratoire, qu'il est possible de guider les cellules nécessaires à la cicatrisation par de faibles courants électriques. La guérison des plaies testées ainsi était jusqu'à trois fois plus rapide avec une stimulation électrique appliquée par des électrodes. **N. G. C.**

SOURCE : SEBASTIAN SHANER, UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, ALLEMAGNE.

La nouvelle carte du cortex moteur

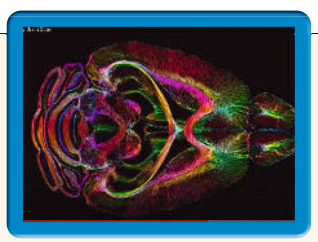
Une équipe de chercheurs a réactualisé et corrigé l'homoncule de Penfield, le schéma des connexions neuronales.



L'homoncule de Penfield (à gauche) cartographiait de façon linéaire les zones du cortex moteur correspondant aux différentes parties du corps. Ce qui se révèle inexact selon une actualisation du célèbre schéma (à droite).

EVAN M. GORDON ET AL.

Véritable icône des livres de neurosciences depuis quatre-vingt-dix ans, l'homoncule de Penfield a été redessiné par une équipe de l'université de Washington (États-Unis) à l'aide de l'IRMf permettant de suivre l'activité neuronale en direct. Ce schéma disgracieux est à l'origine un aide-mémoire pour la cartographie des zones du cortex moteur pilotant les parties du corps, réalisée par Wilder Penfield en 1937. Sauf qu'à l'examen, l'homoncule, dessiné comme linéaire, s'avère plein de trous! Trois vides entre les régions des pieds/orteils, des mains et du visage, zones concernant l'ensemble du corps, connectées entre elles et à d'autres parties du cerveau responsables de la planification d'actions complexes et de la vigilance. Le nouveau schéma publié dans *Nature* confirme que l'organisation sur le cortex moteur n'est pas linéaire (les doigts succédant au coude, la langue aux yeux, etc.) mais concentrique, par zone d'influence : les doigts sont au centre des coudes et des bras, la langue entre les deux yeux, les orteils sont entourés de la zone pilotant la cheville, elle-même entourée de celle des genoux. **H. J.**



DUKE CENTER FOR IN VIVO MICROSCOPY

À VOIR SUR LE NET

Le cerveau le plus net du monde

IMAGERIE Époustouflantes, ces images sont les plus précises d'un cerveau de souris, 64 millions de fois plus nettes qu'avec une IRM classique. Pour pouvoir préserver l'intégrité tridimensionnelle des structures biologiques, il a fallu associer un appareil d'IRM de 9,4 teslas à la microscopie à feuillet de lumière. **S.R.-M.**

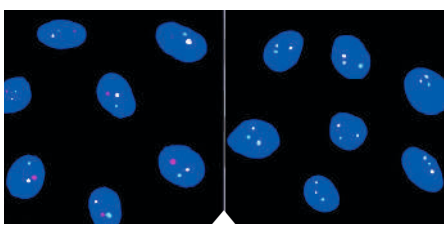
SOURCE : ALLAN JOHNSON, UNIVERSITÉ DUKE, ÉTATS-UNIS

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Peser les spermatozoïdes pour choisir le sexe du bébé

PROCRÉATION Une technique étonnante a permis de sélectionner le sexe d'un embryon avec 80 % de chance de succès chez 105 couples aux États-Unis. Fondée sur l'infime différence de masse entre les chromosomes X, plus lourds, et les chromosomes Y, elle consiste à peser les spermatozoïdes. Sauf situation médicale exceptionnelle, une telle manipulation est interdite dans la plupart des pays. **C. L.**

SOURCE : S. CHEUNG, WEILL CORNELL MEDICINE, ÉTATS-UNIS.



CHEUNG ET AL. 2023. PLOS ONE CC-BY 4.0

Les gamètes porteurs d'un chromosome X plus lourd (à gauche) donneront des filles. Ceux ayant un chromosome Y (à droite), des garçons.

67 millions

Le nombre d'enfants victimes d'un retard de vaccination

PÉDIATRIE Entre les années 2019 et 2021, marquées par la pandémie de Covid-19, 67 millions d'enfants dans le monde n'ont pas reçu tous leurs vaccins de routine. Parmi eux, 48 millions n'en ont même reçu aucun. Des enfants dits « zéro dose » qui seraient 21 000 en France, selon les données du dernier rapport de l'Unicef. **S. R.-M.**

ERGANEO

La planche à roulettes stimule la « marche primitive ».

Un skateboard pour favoriser la marche des prématurés

NÉONATALOGIE Développé avec 300 nouveau-nés bien portants à la maternité Port-Royal à Paris, le Crawliskate vise à stimuler la « marche primitive » des premiers jours, apprise dans le ventre de la mère. Testé sur 44 grands prématurés, le dispositif a permis de compenser en partie le déficit moteur des jambes et de voir les progrès à 9 mois. **H. J.**

SOURCE : MARIANNE BARBU-ROTH, UNIVERSITÉ DE PARIS, FRANCE

Récolté plein sud sur une terrasse

Dégusté bien frais

Crédit photo : Zvardon@VinsAlsace

VA VINS ALSACE

Tant de personnalité(s)

L'ABUS D'ALCOOL EST DANGEREUX POUR LA SANTÉ, À CONSOMMER AVEC MODÉRATION

EMMANUEL LE JACQUOT/DÉPARTEMENT DE LA SEINE-SAINT-DENIS.

Les tombes des époques mérovingienne et carolingienne sont disposées en rangées successives.

210 sépultures mises au jour à Saint-Denis

Les tombes découvertes sont antérieures à la construction de la basilique des rois de France.

La reconstruction programmée pour 2028 de la flèche de la basilique Saint-Denis, démontée il y a plus de 170 ans, a offert l'occasion à l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) de mener des fouilles inédites dans le tombeau des rois de France. Érigée sur le lieu de sépulture présumé de saint Denis, martyrisé vers 250, la basilique a depuis accueilli les dépouilles de 43 rois et 32 reines de France. *« Le site a une histoire exceptionnelle, donc nous étions certains que nous allions trouver énormément de choses »*, confie Cyrille Le Forestier, anthropologue à l'Inrap qui a supervisé les recherches. Entre juin 2022 et la fin des fouilles le mois dernier, les archéologues ont ainsi mis au jour 110 tombes de l'époque mérovingienne (du Ve au VIIIe siècle) et 100 de l'époque carolingienne (du VIIIe au Xe siècle), remarquablement conservées malgré leur agencement chaotique. Une densité de tombes inattendue, dont certaines abritaient même des sarcophages en plâtre quasi intacts.

Des aristocrates et des ecclésiastiques

Non identifiées, les sépultures pourraient être celles d'aristocrates voire d'ecclésiastiques, ce qui expliquerait leur modestie. *« On pensait tout de même trouver des tombes un peu plus riches »*, regrette Yvan Lafarge, archéologue à l'Inrap. En revanche, la disposition des sépultures éclaire la façon dont ce joyau de l'art gothique a été édifié avant son inauguration au XIIIe siècle par le roi Saint Louis. Parmi les pierres utilisées pour les fondations, se détachent des motifs sculptés, chapiteaux et corniches d'architecture romane, issus du bâtiment précédent et réemployés au XIIe siècle. *« Lorsqu'elles gênaient la construction, les tombes ont été amputées et les ossements repoussés en petits tas dans le coin opposé du cercueil »*, explique Cyrille Le Forestier. *L'agencement de certains squelettes nous laisse presque deviner les gestes de la main effectués par les ouvriers chargés du chantier.* » **M. B.**

De l'ADN ancien extrait de traces de sueur

PALÉOGÉNÉTIQUE Une nouvelle méthode a permis de prélever de l'ADN humain sur un pendentif vieux de 20 000 ans sans avoir à réduire en poudre ce dernier. Le procédé d'extraction consiste à plonger les artefacts dans un bain dont la chimie sépare les molécules d'ADN. Une première réalisée sur une dent de wapiti qui avait conservé dans ses pores les traces de sueur d'une dénisovienne. **R. M.**

SOURCE : ELENA ESSEL, INSTITUT MAX-PLANCK D'ANTHROPOLOGIE ÉVOLUTIONNISTE, ALLEMAGNE.

IL A DIT

« Cette pièce de monnaie reflète l'affection que Charlemagne portait à Fastrade et le pouvoir qu'il était prêt à partager avec elle »

Simon Coupland, archéologue à l'université de Cambridge (Royaume-Uni) après la découverte d'une pièce carolingienne, frappée sous le règne de Charlemagne (768-814) en 793 ou 794, faisant figurer le nom de la reine Fastrade, morte en 794.

CENTRE CHARLEMAGNE, AACHEN

SCIENCES ET AVENIR La Recherche & Challenges

DÉCOUVREZ VOTRE NOUVEAU RENDEZ-VOUS

12 conversations surprenantes
par **Erik ORSENNA**

LE FUTUR DE L'ÉNERGIE

Podcasts disponibles sur :
www.sciencesetavenir.fr
& www.challenges.fr

Avec le soutien de

ENGIE

L'origine des chevaux des plaines américaines

Des analyses génétiques révèlent une origine ibérique des animaux utilisés par les Indiens d'Amérique du Nord dès les années 1600.

Une des gravures du site de Tolar (Wyoming, États-Unis), représentant un cheval et son cavalier, attribuées aux tribus Shoshone et Comanche.

PAT DOAK

Du sud de l'Idaho au nord du Kansas (États-Unis), les Amérindiens qui peuplaient les Grandes Plaines et les Rocheuses avaient intégré le cheval dans leur modes de vie dès le début des années 1600, au moins. Bien avant la révolte des Pueblo de 1680 et ses vols massifs de chevaux aux colons européens, parfois présentée comme un tournant dans la diffusion de la culture équestre des Indiens d'Amérique du Nord. Même si les sources espagnoles évoquent environ 100 000 chevaux disparus dès 1670.

Une équipe internationale incluant des représentants Lakota, Comanche, Pawnee et Pueblo, a en effet pu retrouver et dater des ossements dont les analyses génétiques révèlent une origine ibérique. Ces chevaux descendent d'individus qui ont été importés au XVIe siècle par les Espagnols plus au sud, au Texas ou au Nouveau-Mexique. Avant cela, les équidés, pourtant apparus sur le continent il y a environ 5 millions d'années, avaient disparu des Amériques à la fin du pléistocène il y a 12 000 ans. **H. J.**

AHMED EMAM / MINISTRY OF TOURISM AND ANTIQUITIES

Les constellations du zodiaque au temple d'Esna

ÉGYPTOLOGIE De magnifiques peintures en relief représentant les constellations du zodiaque *(ci-contre celle du scorpion)* ont été mises au jour au cours de la restauration du temple d'Esna, à 60 kilomètres au sud de Louxor (Égypte). L'édifice qui devait, à l'époque, représenter le cosmos témoigne ainsi par ces rares motifs de l'influence de l'astrologie babylonienne sur les Égyptiens de l'époque gréco-romaine (environ 332 avant notre ère à 350 de notre ère). **S. De L.**

SOURCE : CHRISTIAN LEITZ, UNIVERSITÉ DE TUBINGUE, ALLEMAGNE.

La génétique révèle l'ascendance perse des Swahili

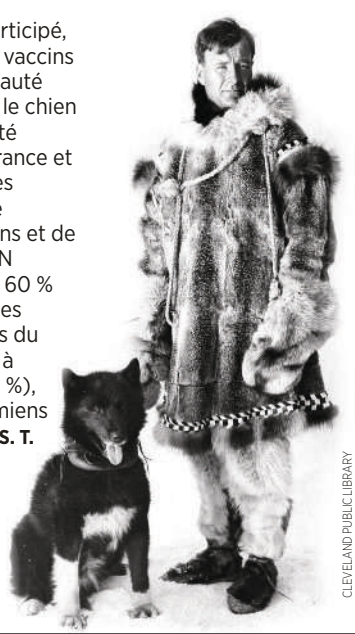
ANTHROPOLOGIE Les Swahili, peuples répartis le long des côtes et des îles d'Afrique de l'Est, ont pour lointains ancêtres masculins des navigateurs persans arrivés il y a environ 1000 ans, indique l'étude génétique de plusieurs dizaines de squelettes locaux vieux parfois de 800 ans. Cette découverte est corroborée par la présence dans le dialecte swahili bantou de 3 % de mots persans et par la *Chronique de Kilwa*, une histoire des Swahili écrite au début du XVIe siècle. **P. K.**

SOURCE : ESTHER BRIELLE, UNIVERSITÉ HARVARD, ROYAUME-UNI.

Le génome séquencé du chien Balto

GÉNÉTIQUE Célèbre pour avoir participé, en 1925, à la livraison héroïque de vaccins contre la diphtérie à une communauté d'Alaska en proie à une épidémie, le chien croisé Balto possédait une diversité génétique lui conférant une endurance et une santé meilleures que celles des chiens de race. C'est ce que révèle l'analyse de 682 génomes de chiens et de loups dont celui de Balto. Son ADN montre que s'il partageait plus de 60 % de son ascendance avec des lignées arctiques (husky sibérien et chiens du Groenland), il est aussi apparenté à des lignées asiatiques (plus de 20 %), dont des chiens de village vietnamiens et même des dogues du Tibet. **A.-S. T.**

SOURCE : KATHERINE MOON, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE À SANTA CRUZ, ÉTATS-UNIS.



CLEVELAND PUBLIC LIBRARY

En 1925, le chien de traîneau avait participé à une expédition en Alaska surnommée la « course au sérum ».

Sous les pavés, une nécropole gallo-romaine

ARCHÉOLOGIE Pas moins de 50 sépultures du IIe siècle après J.-C. ont été découvertes sous une partie de l'avenue de l'Observatoire, en plein cœur de Paris. À l'occasion de travaux à la station RER de Port-Royal, la fouille réalisée par l'Institut de recherches archéologiques préventives (Inrap) a retrouvé la plus grande nécropole gallo-romaine de Lutèce, dont aucun vestige n'avait été trouvé depuis les grands travaux haussmanniens menés au XIXe siècle. **M. B.**

Le Bouddha de la mer Rouge

ARCHÉOLOGIE C'est à Bérénice, une ville portuaire antique du sud-est de l'Égypte, au bord de la mer Rouge, que des archéologues américains et polonais ont eu la surprise de découvrir cette statuette de Bouddha de 71 centimètres de haut. Selon le ministère égyptien des Antiquités qui a annoncé la découverte, elle était placée sur le parvis du principal temple de la ville et témoigne des liens commerciaux importants qui existaient entre l'Empire romain et l'Inde au premier siècle de notre ère. **H. J.**

P. MINISTRY OF ANTIQUITIES, EGYPT

Datée de l'époque romaine, la statuette de Bouddha a été mise au jour à Bérénice (Égypte).

5,6 millions d'euros

Le prix de vente d'un squelette de « T. rex »

Baptisé Trinity, un squelette composite regroupant les fossiles de trois *Tyrannosaurus rex*, espèce ayant vécu il y a environ 66 à 68 millions d'années, a été vendu aux enchères par la maison Koller, en Suisse. C'est seulement le troisième « T. rex » vendu ainsi dans le monde. J. I.

PD COX/ ALAMY/ PHOTO12.COM

La sève de deux arbres était ajoutée à la chaux vive (ici le site de Copan, Honduras).

Le secret de fabrication du ciment maya élucidé

ARCHÉOLOGIE Pour obtenir la solidité exceptionnelle du ciment maya, il faut ajouter à la chaux vive la sève de deux arbres locaux. C'est la découverte de chercheurs espagnols sur les conseils de maçons indiens du Honduras. L'apport des chaînes glucidiques aux cristaux de calcite confère au matériau une grande résistance aux chocs et à l'effet dissolvant de l'eau. Propriétés que l'on retrouve chez les coquillages par exemple. **P. K.**

SOURCE : CARLOS RODRIGUEZ-NAVARRO, UNIVERSITÉ DE GRENADE, ESPAGNE.

THOMAS ANGUS/ IMPERIAL COLLEGE LONDON - AFP - NASA - AFP

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

PHYSIQUE

La lumière passe toujours deux fois

La lumière est capable de passer deux fois au même endroit. C'est toujours sa nature ondulatoire qui est en cause dans cette expérience inédite reproduisant l'expérience des fentes de Young dans le domaine temporel. En perspective, la fabrication de nouveaux dispositifs optiques. À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/916lumos

SANTÉ

Toute l'actualité du Covid-19

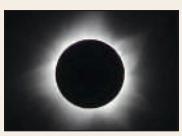
L'OMS a officiellement annoncé que la maladie à l'origine d'au moins 20 millions de morts en trois ans n'était plus une urgence sanitaire de portée internationale. Mais l'actualité de la recherche ne faiblit pas, à suivre au quotidien sur le site de *Sciences et Avenir*. sciav.fr/916covid

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

Une éclipse hybride à revoir



Une rare éclipse hybride de Soleil survenue fin avril dans le ciel de Papouasie-Nouvelle-Guinée, de l'île Timor ou d'Australie a inspiré des photographies spectaculaires. À retrouver en diaporama. sciav.fr/916eclipse

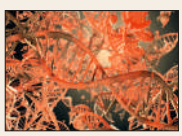
5 minutes

À l'échelle des trous noirs

La Nasa a publié une animation vidéo pour représenter les différentes tailles de trous noirs dans l'Univers, de la plus petite masse à la plus gigantesque. sciav.fr/916blackh

10 minutes

Zoonomia livre ses résultats



Pour décoder l'humain, son évolution et ses maladies, le vaste projet Zoonomia a comparé notre génome à celui de 239 autres mammifères, révélant des fragments d'ADN partagés. sciav.fr/916zoonomia

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

James Webb

Une nouvelle histoire de l'Univers

Le télescope spatial James-Webb enchaîne les découvertes à un rythme impressionnant depuis son lancement fin 2021. L'instrument dévoile les plus anciennes galaxies jamais observées et éclaire les conditions de formation des étoiles et des planètes. La moisson d'exoplanètes promet aussi d'être exceptionnelle.

Dossier réalisé par
Fabrice Nicot

INTRODUCTION
Le plus grand télescope spatial jamais conçu p. 28

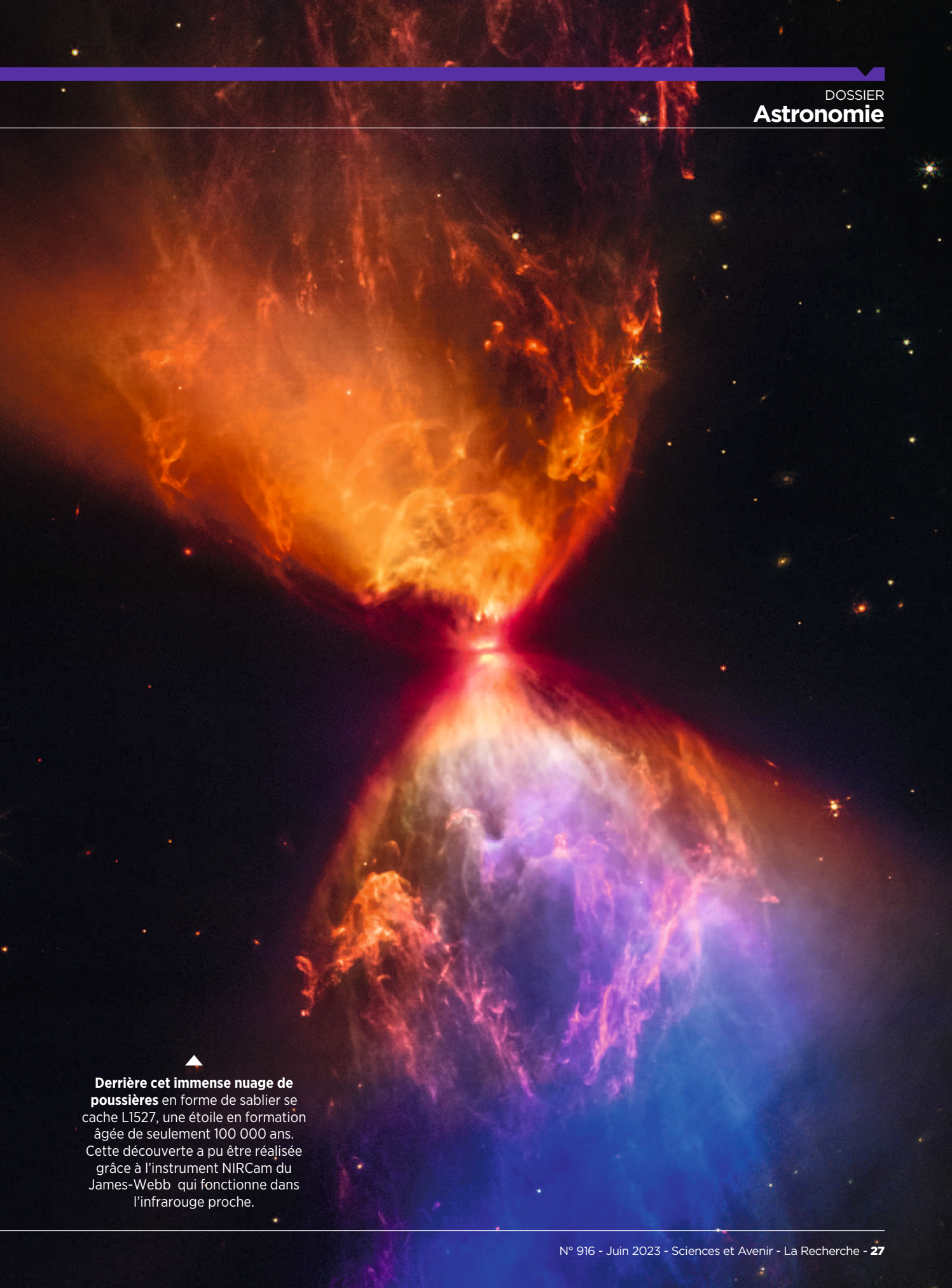
GALAXIES
Voir les premières lumières de l'Univers p. 30

ÉTOILES
Au plus près des molécules élémentaires p. 34

EXOPLANETES
Surprendre les planètes au berceau p. 37

INTERVIEW
David Elbaz directeurscientifique au CEA p. 40

NASA, ESA, CSA, AND STSCI. IMAGE PROCESSING: J. DEPASQUALE, A. PAGAN, AND A. KOEKEMOER (STSCI)



Derrière cet immense nuage de poussières en forme de sablier se cache L1527, une étoile en formation âgée de seulement 100 000 ans. Cette découverte a pu être réalisée grâce à l'instrument NIRCam du James-Webb qui fonctionne dans l'infrarouge proche.

Le plus grand télescope spatial jamais conçu

Les premiers résultats fournis par le télescope spatial James-Webb, qui œuvre principalement dans l'infrarouge, révèlent un univers qui jusque-là nous était inaccessible. Des galaxies observées quelques centaines de millions d'années après le Big Bang aux nuages moléculaires avec une finesse de détails inédite, cet instrument hors normes enchaîne les découvertes.

Depuis son lancement plus que parfait le 25 décembre 2021, le télescope spatial James-Webb (JWST), développé par la Nasa, l'ESA et l'agence spatiale canadienne, enchaîne les découvertes à un rythme impressionnant. D'abord parce que les quatre instruments embarqués « *fonctionnent mieux que prévu* », comme nous l'a confié l'astronome et académicien des sciences Daniel Rouan *(lire p. 37)*. Et parce qu'ils opèrent dans l'infrarouge, une gamme de longueur d'onde qui n'avait jamais été explorée avec autant d'ampleur et de précision jusqu'ici. L'infrarouge traduit les émissions de chaleur. Observer dans ce domaine révèle la présence de corps qui brillent faiblement, comme des planètes assez distantes de leur étoile, ou des naines brunes. Car même relativement froid, tout astre émet un peu de chaleur en comparaison du froid de l'espace. Par ailleurs, contrairement à la lumière visible, la lumière infrarouge se faufile entre les poussières et peut révéler des astres qu'elles cachent, comme des étoiles en formation avec leur cortège de planètes. Enfin, l'infrarouge est la couleur du passé de l'Univers. La lumière d'astres lointains, dans l'espace et donc dans le temps, nous parvient en effet décalée dans l'infrarouge du fait de l'expansion de l'Univers qui a étiré toutes les longueurs d'onde.

Voilà donc pourquoi les premiers résultats présentés dans les pages suivantes révèlent des galaxies observées seulement quelques centaines de millions d'années après le Big Bang *(p. 30)*, des planètes géantes à peine formées, « *tout juste sorties du four* », comme le dit avec humour l'astronome Élodie Choquet *(p. 37)*, ou encore des nuages moléculaires dans lesquels se déroule toute une chimie révélée avec une acuité inédite *(p. 34)*. Car tout le talent du JWST est d'être capable d'embrasser des galaxies entières aussi bien que de saisir des molécules d'eau à la surface de grains de poussière.

Non seulement le télescope fonctionne parfaitement mais sa durée de vie, initialement de cinq ans, devrait atteindre les vingt-six ans selon les dernières estimations, grâce au lancement optimal par Ariane 5, qui lui a permis d'économiser de l'énergie. Combien de découvertes sont encore à venir ? Rarement, jamais peut-être, une telle euphorie n'a régné sur l'astronomie mondiale. Nous espérons que, par ce dossier, elle sera communicative. ■

1,5
million de kilomètres
La distance qui sépare la Terre du James-Webb.

6000 heures
La durée totale des observations réalisées durant le 1er cycle par le télescope.

25 m²
La surface du miroir principal (contre 4 m² pour Hubble).

9,7 milliards de dollars
Le coût total du télescope.

Plus de 1000 personnes
de 17 pays ont participé à sa construction.

L'observatoire de tous les défis

Avec ses 6,5 tonnes et 22 mètres d'envergure, le JWST est doté d'une technologie inédite pour mener à bien ses missions.

Miroir principal

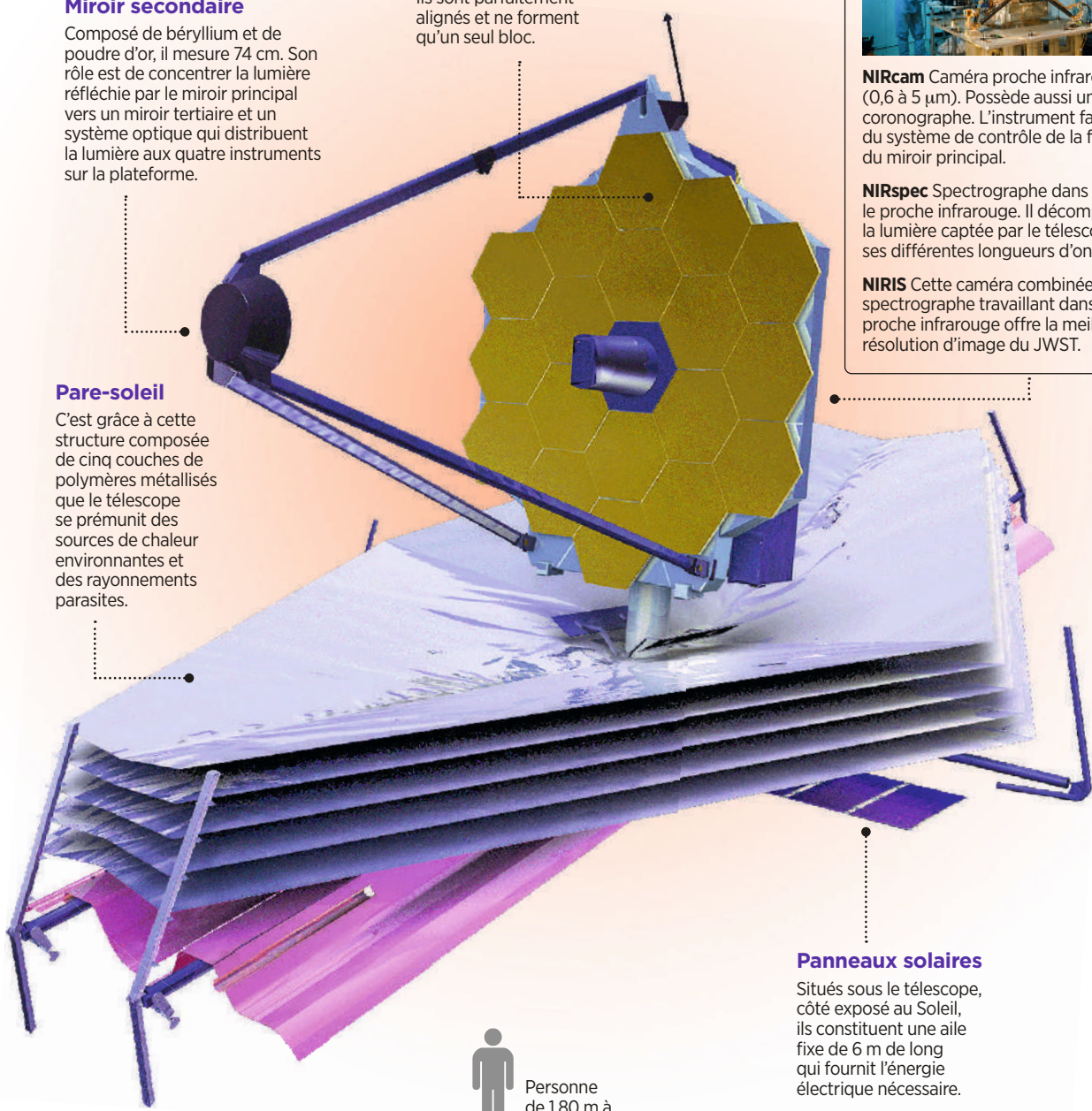
D'un diamètre de 6,5 m, il est composé de 18 panneaux hexagonaux recouverts d'or. Ils sont parfaitement alignés et ne forment qu'un seul bloc.

Miroir secondaire

Composé de béryllium et de poudre d'or, il mesure 74 cm. Son rôle est de concentrer la lumière réfléchie par le miroir principal vers un miroir tertiaire et un système optique qui distribuent la lumière aux quatre instruments sur la plateforme.

Pare-soleil

C'est grâce à cette structure composée de cinq couches de polymères métallisés que le télescope se prémunit des sources de chaleur environnantes et des rayonnements parasites.



Personne de 1,80 m à l'échelle

Panneaux solaires

Situés sous le télescope, côté exposé au Soleil, ils constituent une aile fixe de 6 m de long qui fournit l'énergie électrique nécessaire.

JAMES WEBB SPACE TELESCOPE/NASA

4 instruments scientifiques

MIRI Seule caméra à observer dans l'infrarouge moyen (4,9 à 28,8 µm). Dispose aussi de coronographes pour masquer la lumière d'une étoile et voir les planètes autour.

STEPHEN KILL/STFC

NIRcam Caméra proche infrarouge (0,6 à 5 µm). Possède aussi un coronographe. L'instrument fait partie du système de contrôle de la forme du miroir principal.

NIRspec Spectrographe dans le proche infrarouge. Il décompose la lumière captée par le télescope en ses différentes longueurs d'onde.

NIRIS Cette caméra combinée à un spectrographe travaillant dans le proche infrarouge offre la meilleure résolution d'image du JWST.

Voir les premières lumières de l'Univers

Les observations de l'Univers lointain ont révélé une avalanche de galaxies d'une étonnante précocité. Les premières étoiles se sont sûrement allumées encore plus tôt qu'on ne l'imaginait avant la mise en service du JWST.

En cosmologie, cette période se nomme « les âges sombres ». Elle débute quelques centaines de milliers d'années après le Big Bang, alors qu'aucun astre ne brille encore dans l'Univers. Elle se dissipe à mesure que les premières générations d'étoiles s'allument, dans des embryons de galaxies. Quand précisément ? À quel rythme ? Répondre à ces questions fait partie des missions prioritaires du télescope spatial James-Webb (JWST). Les publications scientifiques se multiplient sur le sujet. *« Nous vivons une période fantastique avec une série de découvertes de galaxies lointaines,* s'enthousiasme Laurence Tresse, astronome au Laboratoire d'astrophysique de Marseille. *C'est aussi un peu la course à l'échalote, car chacun veut être le premier à annoncer la découverte de la galaxie la plus lointaine. Cela peut donner lieu à des publications un peu hâtives, mais qu'importe : les observations du JWST dévoilent des premières galaxies à des époques reculées de l'Univers. Et ce n'est qu'un début…* »

Cette pêche miraculeuse aux astres lointains s'opère grâce à des coups de filet lancés par le James-Webb dans de vastes zones de l'Univers. Ce que l'on appelle des « champs profonds ». Or voir loin dans l'espace, c'est voir loin dans le temps et donc s'approcher des origines. Ces champs ont déjà été scrutés par d'autres instruments, au sol comme dans l'espace, notamment par le télescope spatial Hubble. *« Il s'agit de combiner ces nouvelles données avec les anciennes, et de découvrir des sources lumineuses encore jamais atteintes avec les précédents instruments. Les premiers cycles d'observations commencés à l'automne 2022 représentent plus de 400 heures de travail* », complète Laurence Tresse. De quoi faire son marché, et il est abondant. Du côté des records, avant le James-Webb, la galaxie la plus lointaine connue était Gn-z11 *(lire* S. et A. *n° 891, p. 26)*. Repérée en 2016 par Hubble, elle se trouve seulement 413 millions d'années après le Big Bang. Ce record ne tient plus. D'abord parce que les mesures du JWST la placent désormais à 434 millions d'années, donc légèrement plus près de nous. Et surtout parce qu'une première étude fait état de trois galaxies plus lointaines encore que GN-z11. *« Oui, elle est battue,* se félicite Stéphane Charlot, chercheur à l'institut d'astrophysique de Paris et cosignataire de l'étude. *Nous avons obtenu confirmation de la présence d'une galaxie à seulement 320 millions d'années après le Big Bang. Deux autres sont à 340 millions d'années et 384 millions.* » Des records provisoires, comme le souligne Laurence Tresse. *« Ces quatre galaxies confirmées font partie d'un lot d'une dizaine de candidates à*

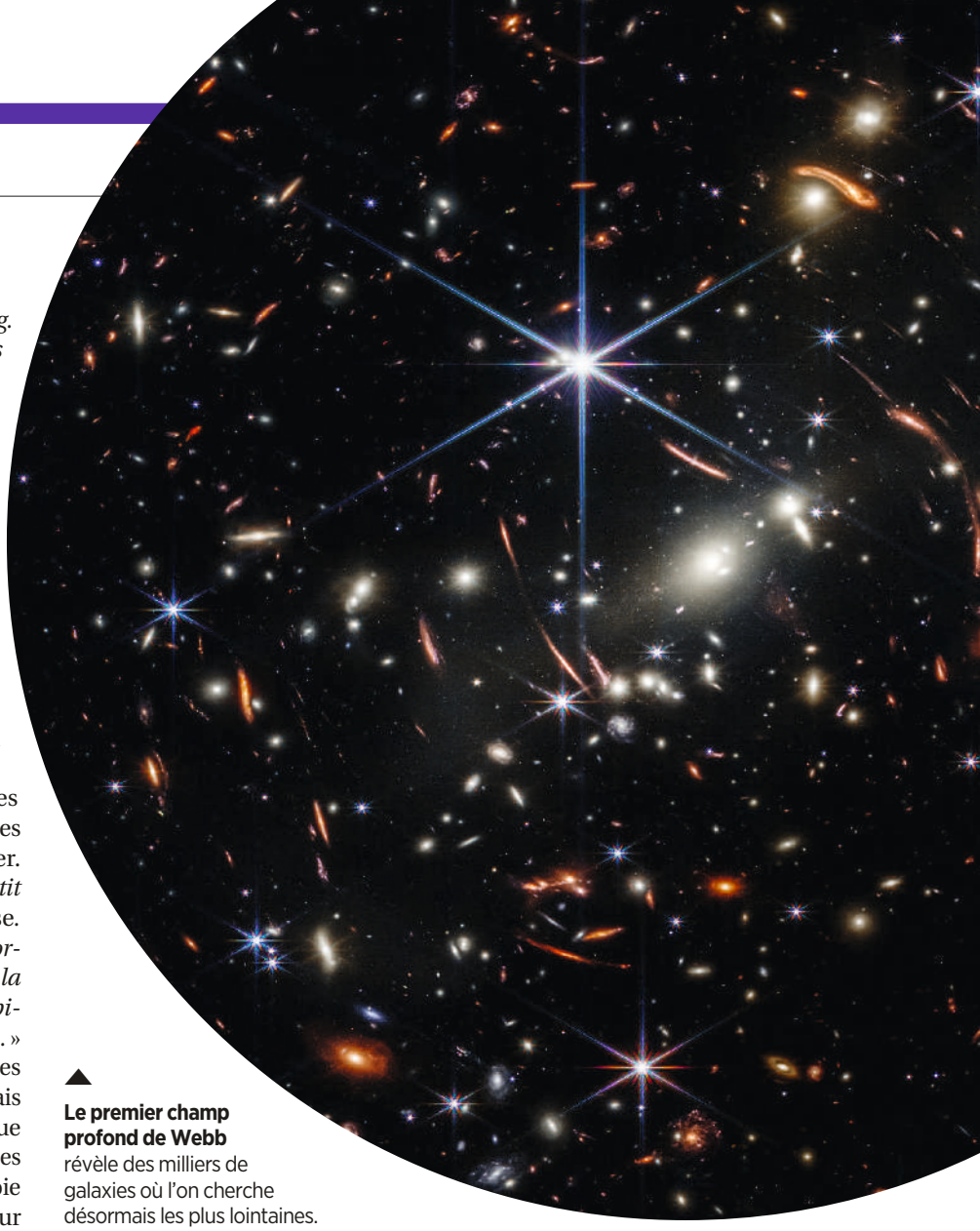
100 millions de masses solaires environ
pour les plus lointaines galaxies, donc les plus jeunes, observées par le télescope James-Webb.

LAM

« Nous vivons une période fantastique avec une série de découvertes de galaxies lointaines »

Laurence Tresse, astronome au Laboratoire d'astrophysique de Marseille

moins de 470 millions après le Big Bang. La plus lointaine est à 224 millions d'années. Mais il s'agit d'une "candidate", il faut encore confirmer cette mesure pour qu'elle soit officielle. »
Cette distinction entre galaxie « candidate » et « officielle » tient à la méthode utilisée pour déterminer sa distance, d'abord par photométrie pour une estimation, puis par spectroscopie pour une confirmation *(lire l'encadré ci-dessous)*. Quoi qu'il en soit, il faut se faire à l'idée que l'Univers est peuplé de galaxies bien au-delà de ce qui avait été vu jusque-là *(lire l'entretien p. 40)*.
Et le JWST ne se contente pas de les recenser. La résolution spatiale de ses instruments permet de les détailler. *« Gn-z11 vu par Hubble, c'était un petit "blob" !* se souvient Laurence Tresse. *Tandis que le JWST nous révèle la morphologie de ces galaxies : leur taille, la présence éventuellement de bras spiraux, les zones de formation d'étoiles… »*
Alors à quoi ressemblent ces premières galaxies ? Elles sont de petite taille, mais assez compactes, et plus massives que prévu, autour de 100 millions de masses solaires. C'est 100 fois moins que la Voie lactée, mais cela reste beaucoup pour



NASA, ESA, CSA, AND STSCI

▲ **Le premier champ profond de Webb** révèle des milliers de galaxies où l'on cherche désormais les plus lointaines.

MÉTHODE

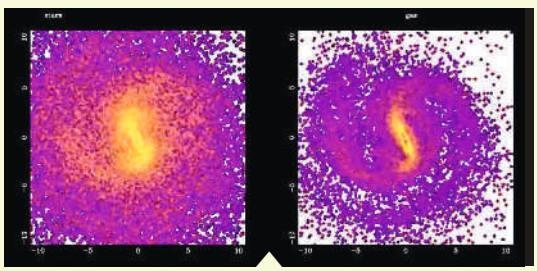
Comment déterminer la distance qui nous sépare des galaxies ?

Toutes les observations effectuées par les instruments du JWST se font dans le domaine infrarouge. C'est la « couleur » des objets lointains, même si à l'origine ils émettent dans toutes les longueurs d'onde. Mais à cause de l'expansion de l'Univers, leur lumière subit une importante dilatation, ce qui étire sa longueur d'onde qui se retrouve ainsi dans l'infrarouge. Ce décalage dit vers le rouge permet d'estimer la distance de l'astre, à partir du taux d'expansion de l'Univers. La méthode photométrique mesure le décalage de l'ensemble du rayonnement lumineux d'une galaxie. Il est plus rapide à obtenir, mais il est imprécis car il se fonde sur une estimation du rayonnement initial de la galaxie calculée à partir de modèles. Les galaxies candidates sont déterminées ainsi. Mais la confirmation ne peut être obtenue que par la méthode spectrométrique. Dans ce cas, on va observer le décalage vers le rouge d'un rayonnement connu avec certitude, comme celui de l'atome d'hydrogène, par exemple. Cette mesure donne le décalage et donc la distance avec une grande précision, mais elle est plus délicate à réaliser.

THÉORIE

Les modélisations au défi des nouvelles observations

Côté « théorie », l'heure n'est pas encore à la révolution, mais aux ajustements, selon Jérémy Blaizot et Joakim Rosdahl, physiciens théoriciens au Centre de recherche astrophysique de Lyon. « *Il existe plusieurs modèles pour décrire la formation et l'évolution des galaxies. Certains ne prévoient pas des galaxies aussi jeunes et massives, comme vues par le JWST. Mais d'autres oui. Cela va sans doute nous amener à ajuster nos modèles, mais pas encore à les remettre fondamentalement en cause.* » Ces modèles reposent sur deux paramètres principaux : l'efficacité de la conversion de gaz froid en étoiles, et l'action des étoiles massives sur leur environnement. Elles émettent de fortes quantités de rayonnement ultraviolet, et explosent en supernovae ce qui a un impact sur la formation d'autres étoiles. « *Ces premiers résultats vont donc nous permettre d'ajuster ces paramètres, d'autant plus qu'avant le JWST, nous n'avions pas beaucoup de données concernant les galaxies lointaines. Mais il faut encore vérifier les premiers résultats du télescope. Des galaxies annoncées comme très massives et très lointaines se sont révélées moins massives et moins lointaines* », avertissent les chercheurs.



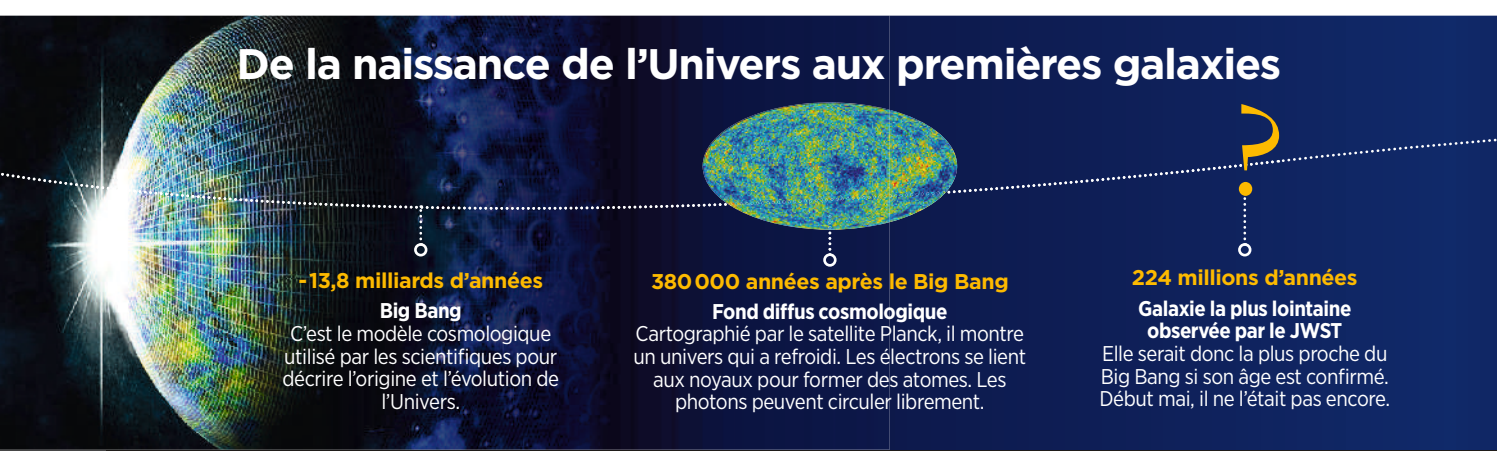
THE UNIVERSITY OF TEXAS, AUSTIN

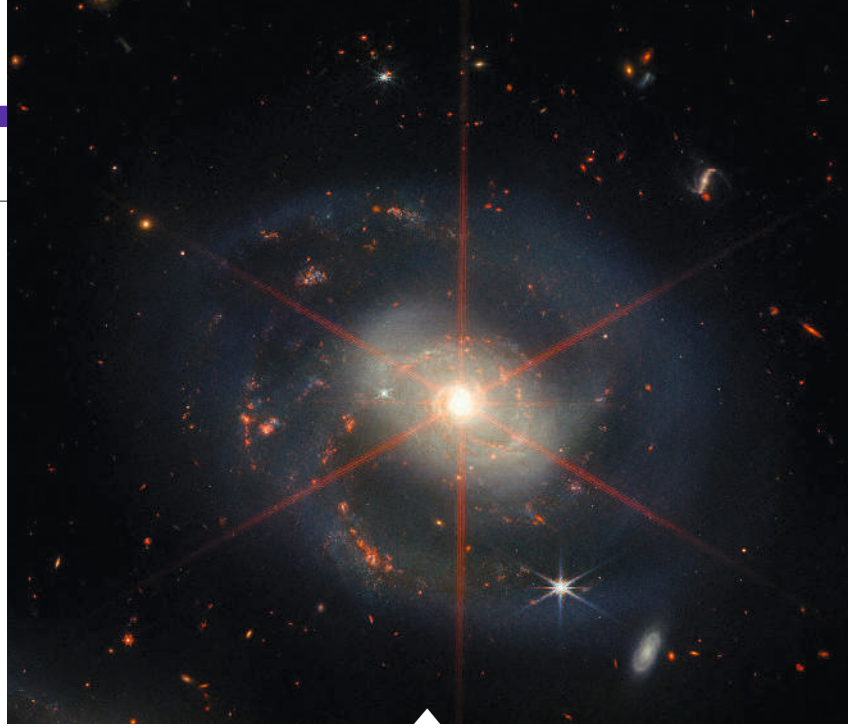
Simulation de la formation d'une galaxie spirale, avec la répartition des étoiles (à gauche) et celle du gaz (à droite).

des embryons de galaxies. Elles se composent d'étoiles jeunes, autour d'une centaine de millions d'années. L'une des grandes surprises est justement leur taux de formation d'étoiles, très élevé. « *De l'ordre de 1 à 2 masses solaires par an,* précise Laurence Tresse. *C'est-à-dire autant que la Voie lactée, bien plus massive. Ce taux est donc en proportion très important.* »

La traque de la toute première génération d'étoiles

Sommes-nous devant la toute première génération d'étoiles, dites de population III ? « *Non, pas encore,* répond sans hésiter Stéphane Charlot. *En analysant la lumière de GN-z11, nous détectons la présence d'azote, de carbone, de néon, de magnésium, d'oxygène… Ce sont des atomes lourds formés dans des supernovae, ces explosions d'étoiles en fin de vie. Les étoiles de population III ne peuvent contenir pratiquement que de l'hydrogène et de l'hélium, les atomes les plus simples issus du Big Bang. S'il y en a de plus gros, alors cela signifie que nous sommes au-delà de la première génération.* »
La première génération d'étoiles s'est éteinte tôt car celles-ci consument très rapidement leur hydrogène et explosent après un ou deux millions d'années. Mais les performances du JWST sont telles que les scientifiques restent confiants. « *Les "populations III" ? Ce sera peut-être le sujet*





ESA/WEBB, NASA & CSA, L. ARMUS, A. S. EVANS

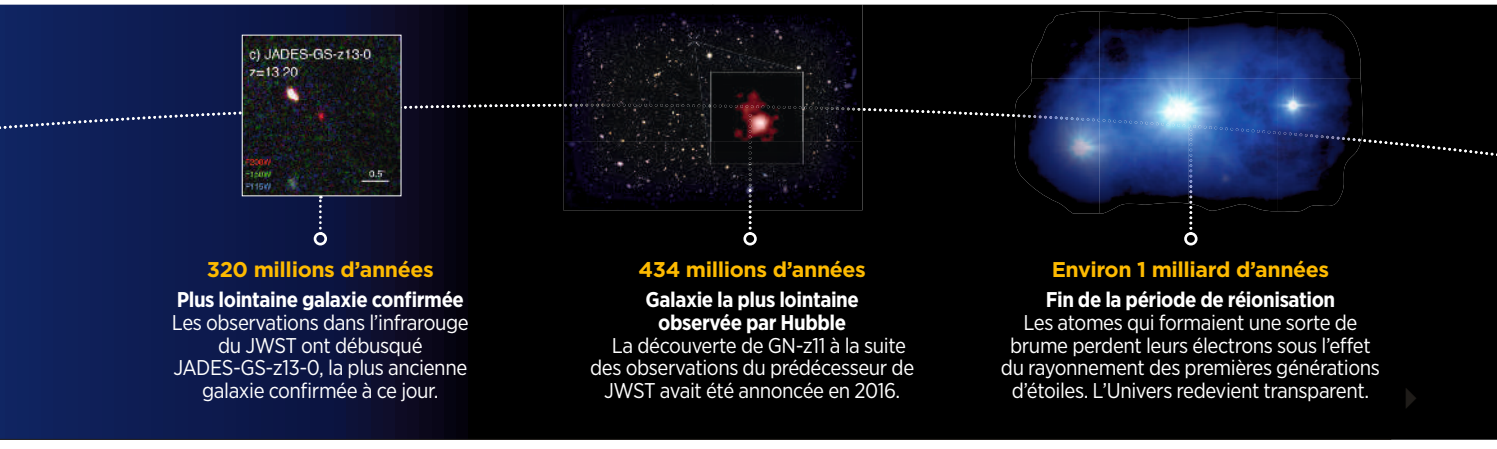
La galaxie NGC 7469, située à 220 millions d'années-lumière de la Terre, est un magnifique exemple de galaxie spirale. On sait désormais que de tels bras se sont formés très tôt dans l'Univers.

de votre article l'année prochaine », espère Laurence Tresse.

En attendant, l'analyse de la composition de ces galaxies témoigne bien de leur jeune âge car elles contiennent peu de métaux, qui se fabriquent dans les supernovae. Certaines sont toutefois assez âgées pour abriter en leur sein une véritable énigme : des « Little Hidden Monsters » (petits monstres cachés), comme le rapporte Stéphane Charlot… *« Ce sont des trous noirs nichés au cœur des galaxies* », révèle l'astrophysicien. Un *« petit monstre »* de 100 millions de masses solaires a ainsi été détecté dans une galaxie vue par le JWST un milliard d'années après le Big Bang. *« Ces trous noirs ne respectent pas une loi qui veut que leur masse soit* grosso modo *proportionnelle à celle du bulbe* [partie centrale de la galaxie entourant le noyau]. *Ils sont plus gros.* » Enfin, certaines galaxies possèdent des bras spiraux, moins développés mais similaires à ceux d'Andromède, et cela seulement 1,2 milliard d'années après le Big Bang. Précocité, encore… Toutes ces observations nourrissent déjà les théoriciens qui les comparent avec les prévisions de leurs modèles de formation des galaxies. Modèles qui devront sans doute évoluer *(lire l'encadré ci-contre)*.

Le JWST, qui s'apprête à commencer son deuxième cycle d'observations, poursuit sa quête de galaxies lointaines afin de constituer des échantillons représentatifs, et évacuer la possibilité qu'il ait simplement eu de la chance jusqu'à maintenant en débusquant toutes ces galaxies primitives. L'objectif derrière ce recensement est d'éclairer, au sens propre comme au sens figuré, ces fameux âges sombres, et notamment un phénomène bien particulier que l'on nomme « réionisation ». 380 000 ans après le Big Bang, l'Univers avait suffisamment refroidi pour laisser passer la lumière qui auparavant était sans cesse absorbée par la matière. Ce premier rayonnement s'appelle le fond diffus cosmologique. Mais en réalité, à cette époque, l'Univers est rempli d'une brume, composée de gaz d'hydrogène et d'hélium. Ce sont les premières générations d'étoiles qui vont le rendre vraiment transparent. *« Leur intense rayonnement ultraviolet arrache les électrons qui entourent les noyaux atomiques,* explique Laurence Tresse. *Les atomes se transforment en ions, des particules chargées électriquement* ». L'Univers baigné de rayonnement ultraviolet se trouve bientôt rempli de noyaux d'hydrogène, des protons, et des électrons qui n'interagissent pas avec la lumière. La brume se déchire… *« Nous savons qu'environ un milliard d'années après sa naissance, l'Univers est devenu tel qu'il est aujourd'hui, totalement ionisé. En revanche, nous ignorons encore quand ce processus a commencé, et à quelle vitesse il s'est déroulé. C'est seulement en remontant toujours plus loin vers les premières galaxies que nous pourrons quantifier ce phénomène.* » ■

CFA/M. WEISS - NASA / WMAP - NASA, ESA, CSA, AND STSCI - NASA, ESA, STSCI - NASA/WMAP



320 millions d'années

Plus lointaine galaxie confirmée

Les observations dans l'infrarouge du JWST ont débusqué JADES-GS-z13-0, la plus ancienne galaxie confirmée à ce jour.

434 millions d'années

Galaxie la plus lointaine observée par Hubble

La découverte de GN-z11 à la suite des observations du prédécesseur de JWST avait été annoncée en 2016.

Environ 1 milliard d'années

Fin de la période de réionisation

Les atomes qui formaient une sorte de brume perdent leurs électrons sous l'effet du rayonnement des premières générations d'étoiles. L'Univers redevient transparent.

Des molécules élémentaires aux systèmes planétaires

En scrutant des nuages moléculaires, le télescope spatial procède à un inventaire des espèces chimiques en présence, et éclaire les conditions de formation des étoiles et des planètes.

Ces voiles gigantesques s'étirent entre les étoiles, parfois sur des dizaines d'années-lumière. Ils sont faits d'hydrogène et d'hélium, les éléments les plus abondants de l'Univers, forgés lors du Big Bang. Leur température n'excède pas les -263 °C. Difficile de croire que ces nuages glacés, 100 milliards de fois moins denses que l'atmosphère terrestre, constituent le berceau des étoiles et de leur cortège de planètes. Comment passe-t-on d'un environnement aussi rudimentaire aux sophistications d'un système solaire comme le nôtre ? Cette interrogation est au cœur du projet Ice Age du télescope spatial James-Webb (JWST), qui a fourni de premiers résultats dans une publication parue dans *Nature Astronomy* le 23 janvier.

Tout au long de cette première année d'observations, le télescope a tourné régulièrement ses instruments vers le nuage Caméléon I, à 630 années-lumière de la Terre, dans la constellation du Caméléon (hémisphère sud). *« Cette zone contient toute l'histoire de l'évolution chimique menant des nuages de gaz atomiques et moléculaires jusqu'aux étoiles. Mais nous avons choisi d'étudier une zone éloignée des étoiles en formation afin d'avoir accès à la matière la plus froide, et la plus brute »*, explique Jennifer Noble, astrophysicienne au laboratoire Physique des interactions ioniques et moléculaires (CNRS/université Aix-Marseille), et coauteure de l'article. L'objectif était de faire l'inventaire des espèces chimiques de cette région, en sondant le plus profondément possible dans le nuage. *« Pour cela, on se sert d'une étoile en arrière-plan qui n'appartient pas au nuage, mais que sa lumière traverse,* poursuit la chercheuse. *Les espèces chimiques absorbent au passage sélectivement certaines longueurs d'onde de la lumière. Leur analyse par spectroscopie révèle les "empreintes" qui constituent une carte d'identité des molécules rencontrées. »* Et la moisson a été bonne : des glaces simples comme l'eau, mais aussi les formes gelées d'un large éventail de molécules : sulfure de carbonyle, ammoniac, méthane, et jusqu'à la molécule organique la plus simple, le méthanol. Tout cela à partir, donc, de l'hydrogène et de l'hélium…

« Une telle chimie est possible grâce à la présence de poussières dans ces nuages, détaille Jennifer Noble. *Elles servent de support pour les réactions. Par exemple, deux atomes d'hydrogène se rencontrent sur le grain et établissent une liaison. La réaction libère assez d'énergie pour expulser le dihydrogène dans l'espace. En revanche, si un atome d'oxygène lié à un atome d'hydrogène (OH) rencontre sur le grain un atome d'hydrogène, la réaction ne libère pas assez d'énergie pour permettre à l'eau ainsi formée de s'évader. La molécule adhère au grain, et forme de la glace. C'est ainsi que tous les grains sont recouverts d'une pellicule de glace, dont le JWST permet d'attester la présence. »*

JENNIFER NOBLE

« Le nuage Caméléon I contient toute l'évolution chimique menant des nuages de gaz atomiques et moléculaires jusqu'aux étoiles »

Jennifer Noble, astrophysicienne au laboratoire Physique des interactions ioniques et moléculaires (CNRS/université Aix-Marseille)

Le James-Webb a observé durant un an le nuage moléculaire Caméléon I, dans la constellation du Caméléon, à 630 années-lumière de la Terre.

NASA, ESA, CSA, AND M. ZAMANI (ESA). SCIENCE: M. K. MCCLURE (LEIDEN OBSERVATORY), F. SUN (STEWARD OBSERVATORY), J. SMITH (OPEN UNIVERSITY), AND THE ICE AGE ERS TEAM

Toute la ribambelle de molécules observées par le télescope spatial, grâce aux instruments NIRCam, NIRspec et MIRI, se sont formées ainsi. Leur découverte n'est toutefois pas tant une surprise qu'une confirmation. Bon nombre d'entre elles avaient été vues par les télescopes spatiaux infrarouges Spitzer (Nasa), Akari (Jaxa) et ISO (ESA), mais jamais aussi profondément dans un nuage, ce que vient de réaliser le JWST. *« La lumière d'une étoile qui traverse le nuage dans sa zone la plus dense est forcément très atténuée. Les instruments précédents, de plus petite taille, ne permettaient pas de recueillir suffisamment de photons pour les analyser. Le JWST a bouleversé tout cela. »*

Le rôle des étoiles massives sur le destin des systèmes solaires

Et la moisson n'est pas terminée. Ces premières mesures n'excluent pas la présence de molécules plus complexes. Des spectres traçant la présence de liaisons carbone-hydrogène, carbone-azote-hydrogène, ou encore carbone-soufre-oxygène ont été détectés par NIRSpec. *« Tous ces groupements fonctionnels suggèrent la présence de molécules organiques complexes, mais il est encore trop tôt pour les attribuer à telle ou telle molécule. Nous sommes en quelque sorte en présence des pièces d'un puzzle qu'il nous faut assembler. »* Par ailleurs, lors des prochains cycles d'observation, le JWST analysera d'autres nuages moléculaires afin de conforter les résultats sur Caméléon I.

Les étoiles et les planètes disposent donc d'une vaste panoplie de molécules organiques complexes, indispensables à la vie, lorsqu'elles se forment par effondrement d'une partie de ces nuages. Comment se produisent de tels effondrements ? Les premiers résultats, qui ne concernent pas directement la formation des étoiles mais plutôt les conditions de leur formation, sont déjà là. Olivier Berné, astrophysicien à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse, dirige l'un des pro-

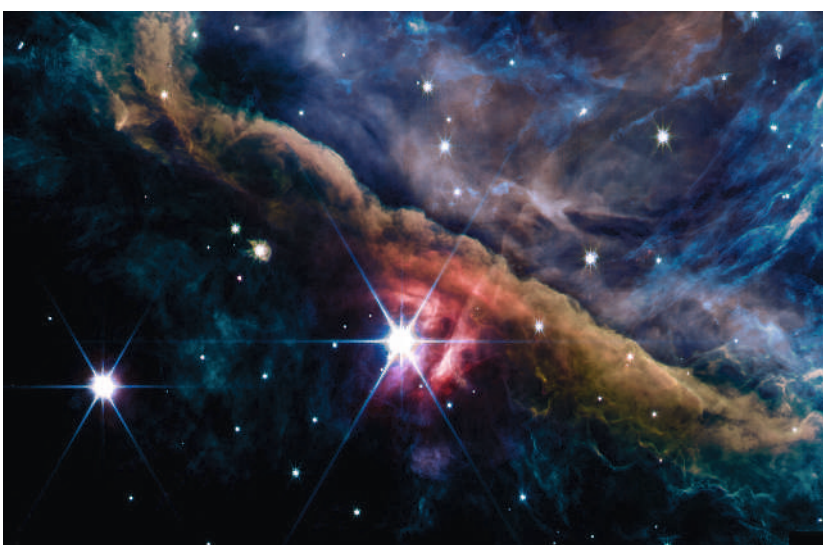
grammes prioritaires du JWST consacré à l'étude de l'impact des étoiles massives (au-delà de huit masses solaires) sur leur environnement. En effet, lorsque l'on parle de « naissance d'étoiles », il faut penser au pluriel… *« Il y a l'image classique du nuage moléculaire qui s'effondre et forme une étoile,* reconnaît Olivier Berné. *Mais ça ne se passe pas comme ça. Dans la majorité des cas, les étoiles naissent en amas, dans lequel il y a toujours une ou plusieurs étoiles massives. Ainsi, lorsqu'apparaît une étoile de type solaire, il y a toutes les chances qu'à côté se trouve une étoile massive. Et par son rayonnement, elle va complètement perturber l'environnement de l'étoile, et le destin des planètes éventuelles.* »

Les étoiles massives brûlent la chandelle par les deux bouts. Elles vivent bien moins longtemps que notre soleil (quelques centaines de millions d'années, voire moins) car elles consomment rapidement leur hydrogène qui fusionne en hélium. À cette occasion, elles irradient une très forte quantité de rayons ultraviolets. Ce rayonnement agit sur les molécules en brisant des liaisons chimiques. Par ailleurs, il transporte beaucoup de chaleur… Ainsi, une étoile massive a un impact fondamental sur toute la chimie qui l'entoure. *« Or, jusqu'à présent, nous savions très peu de choses sur ce type d'environnements. Nous connaissions leur existence, mais sans pouvoir les analyser, d'autant plus que la région de formation d'étoiles massives la plus proche est la nébuleuse d'Orion, à 1350 années-lumière. La sensibilité et la résolution du JWST nous ont permis pour la première fois d'analyser physiquement et chimiquement la zone.* »

L'un des premiers résultats obtenus justement dans la nébuleuse d'Orion illustre d'emblée le rôle capital des étoiles massives sur le destin des systèmes solaires en formation. *« Nous pensons par exemple qu'une étoile massive empêche la formation de géantes gazeuses de type "Jupiter" dans un système proche. Car le rayonnement ultraviolet chauffe le gaz de telle sorte qu'il échappe au champ gravitationnel de l'étoile, en particulier si celle-ci est de faible masse. Un disque ainsi chauffé perdrait l'équivalent de 1 % de la masse de la Terre par an. De quoi faire disparaître le disque en 400 000 ans au maximum, ce qui ne laisse pas assez de temps pour former une planète de type "Jupiter".* »

Des résultats qui éclairent aussi notre propre histoire

Ce résultat confirme les observations de systèmes d'exoplanètes où, en effet, il n'y a pas de géantes autour d'étoiles de faible masse. L'explication donnée jusqu'à présent était que des étoiles plus petites retenaient forcément moins de matière autour d'elles, et donc ne parvenaient pas à former des planètes géantes. *« Mais cette explication n'était pas complètement satisfaisante, car il a déjà été observé des disques protoplanétaires très massifs autour d'étoiles peu massives,* relève Olivier Berné. *Notre explication est intéressante car elle apporte une solution fondée sur la physique en lien avec l'environnement du système* ». Notre propre système solaire a subi l'influence d'une étoile massive durant au moins son premier million d'années, ces études de formation des étoiles et de leurs planètes renvoient donc aussi à notre propre histoire. *« Heureusement pour nous, cette étoile devait être assez éloignée pour empêcher Jupiter de se former. Sans cela, le Système solaire aurait eu un aspect bien différent* ». Et rien ne garantit que nous serions là pour le contempler… ■



NASA, ESA, CSA

PORTRAIT

La nébuleuse d'Orion dévoilée par le JWST

C'est la pouponnière d'étoiles la plus proche du Système solaire, à 1350 années-lumière de nous *(photo ci-dessus)*. Il s'y forme des étoiles à partir de l'effondrement de nuages moléculaires sur eux-mêmes. La région est scrutée depuis longtemps par les astronomes amateurs tout comme par Hubble. Le James-Webb, en observant dans l'infrarouge, permet de voir à travers les poussières qui obscurcissent en partie le nuage. Ces nouvelles images révèlent des structures spectaculaires, jusqu'à des échelles d'environ 6 milliards de kilomètres. Parmi elles, des filaments de matière denses, où se formeraient les nouvelles générations d'étoiles. Notre système solaire s'est sans doute formé dans des conditions analogues.

NASA, ESA, CSA, JOSEPH OLMSTED (STSCI)

L'exoplanete géante VHS 1256b (vue d'artiste), dont l'atmosphère a été analysée, dévoile des particules de silicate.

Surprendre les planètes au berceau

L'observation de systèmes planétaires dans l'infrarouge permet de discerner des astres âgés de quelques millions d'années seulement, encore flamboyants de leur énergie de formation.

Un peu de patience… C'est le mot d'ordre concernant les exoplanètes. Les résultats se bousculent moins qu'ailleurs et c'est normal. Contrairement aux galaxies ou aux nuages moléculaires qui s'offrent en permanence aux instruments, les planètes s'observent sur rendez-vous. Lorsqu'elles passent devant leur étoile par exemple. C'est la méthode des transits. Et pour une observation directe des planètes les plus massives — ce que permet également le télescope spatial James-Webb grâce à son acuité dans l'infrarouge —, il faut le temps de traiter l'image afin de séparer la planète de son étoile, jusqu'à un million de fois plus brillante qu'elle. Mais pas d'inquiétude. À l'issue de cette première année, les chercheurs ont acquis une certitude : *« Les instruments fonctionnent encore mieux que ce qui était prévu. C'est assez rare pour être souligné »*, se félicite l'astrophysicien Daniel Rouan, membre de l'Académie des sciences. Son équipe a supervisé pour la caméra MIRI la réalisation d'un jeu de coronographes qu'il a conçu et qui masque la lumière de l'étoile afin de distinguer les planètes. *« C'est ainsi que le système HR 8799, situé à 130 années-lumière de la Terre, a été observé,* explique-t-il. *Il se compose de quatre planètes de type Jupiter. Elles sont toutes très éloignées de leur soleil* [entre 15 et 70 unités astronomiques], *mais nous pensions être incapables de voir la planète la plus proche de l'étoile* [il est difficile de distinguer la lueur d'une planète proche de son étoile]. *Pourtant nous l'avons vue ! Nous avons aussi détecté la présence d'un disque intérieur de poussières, peut-être un disque protoplanétaire.* »

Élodie Choquet, astronome au Laboratoire d'astrophysique de Marseille,

OLIVIER MONGE/MYOP POUR SCIENCES & AVENIR-LA RECHERCHE

L'image coronographique pointée par Élodie Choquet a été traitée pour masquer la lumière de l'étoile et distinguer les planètes en formation (à gauche, l'image non traitée captée par l'instrument MIRI).

« Les exoplanètes, nous les aimons tout juste "sorties du four". Elles sont très chaudes car elles possèdent encore une grande partie de leur énergie de formation »

Élodie Choquet, astronome au Laboratoire d'astrophysique de Marseille (Bouches-du-Rhône)

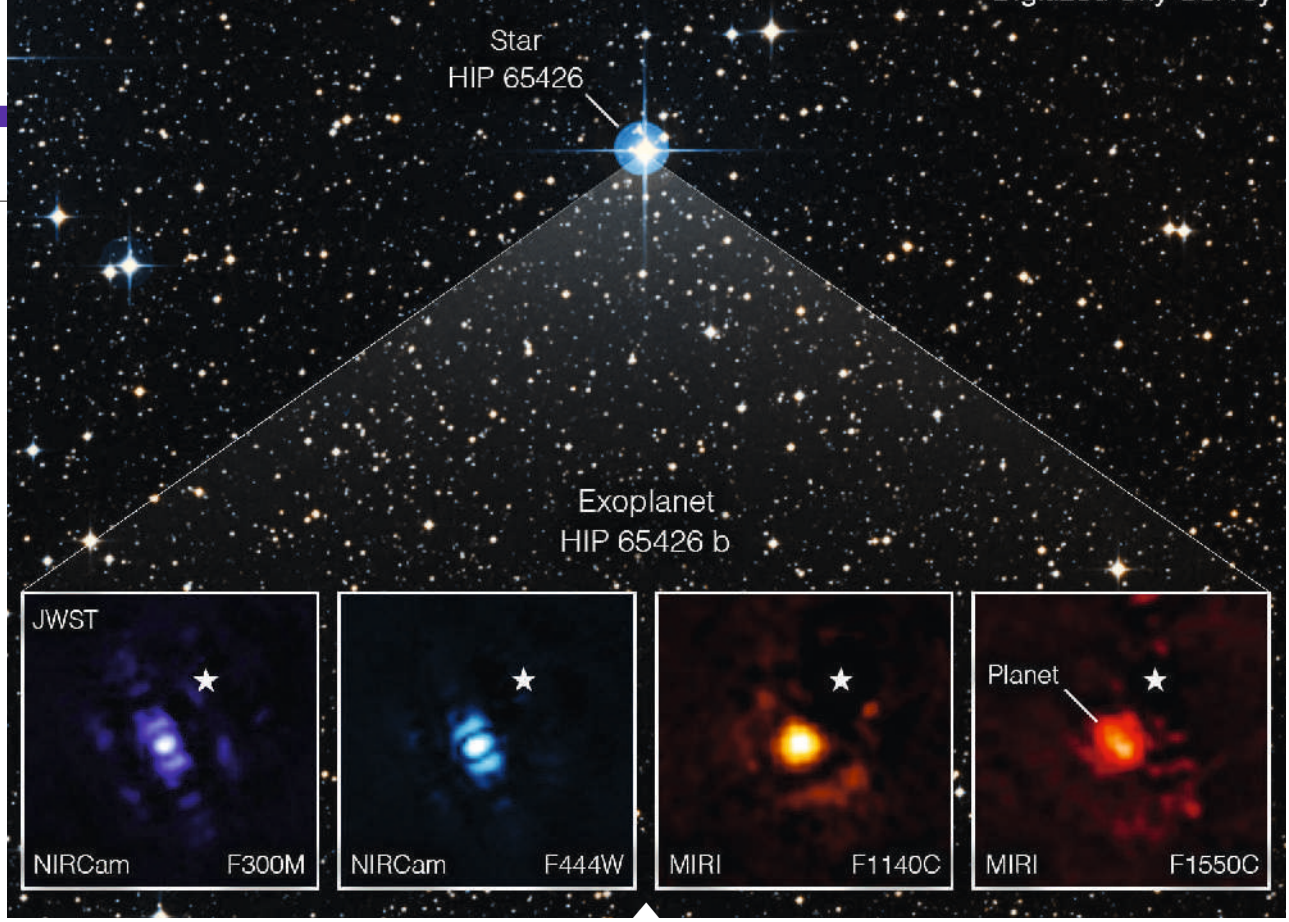
se réjouit également des performances du James-Webb. *« En combinant les instruments Nirspec et MIRI, nous contemplons les exoplanètes dans une gamme de longueur d'onde allant de 1 à 20 micromètres* [soit l'infrarouge proche et moyen]. *C'est la première fois que nous disposons d'une palette aussi large. Les instruments au sol sont empêchés par le fait que l'atmosphère terrestre est chaude et émet aussi à ces longueurs d'onde, cachant ainsi les signaux astronomiques que l'on cherche à étudier.* » Cette large bande du spectre donne accès à toute une « bibliothèque » de molécules qui émettent précisément dans ces longueurs d'onde. C'est ainsi la possibilité de détecter l'eau, le méthane, l'ammoniac, le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone… Et cela sur des cibles particulières : les planètes jeunes. *« Les exoplanètes, nous les aimons tout juste "sorties du four",* s'amuse Élodie Choquet. *Elles sont très chaudes car elles possèdent encore une grande partie de leur énergie de formation.* » La chercheuse a ainsi participé à l'étude de HIP 65426-b, dont les images ont été révélées en septembre 2022. Sa température est d'environ 1400 °C, son âge de 15 millions d'années (un « bébé » si l'on songe aux 4,5 milliards d'années de la Terre) et sa masse atteint sept fois celle de Jupiter !

Autre planète inscrite au tableau de chasse du JWST : VHS 1256b. Cette géante d'environ 20 fois la masse de Jupiter a fait l'objet d'une publication dans *Astrophysical Journal Letters* le 22 mars. *« Pour la première fois, nous avons pu mettre en évidence la présence de poussières dans l'atmosphère de la planète »*, explique Élodie Choquet, cosignataire de l'article. Il s'agit de particules de silicates dont les plus grosses ressemblent à du sable, les plus petites à celles que l'on trouve dans de la fumée. Sa température a été évaluée à environ 830 °C. Autant d'indices qui témoignent là encore de la jeunesse de la planète. *« La poussière est expédiée en altitude parce que l'atmosphère est très turbulente, et la gravité relativement faible. La gravité d'une planète augmente en effet avec le temps à mesure*

RÉSULTAT

Des indices d'une chimie à l'œuvre dans l'atmosphère des exoplanètes

Le James-Webb a passé au crible l'atmosphère de WASP-39b, une géante gazeuse d'une masse comparable à Saturne, avec une surprise à la clé. En plus du sodium, de l'eau, du CO_2, du CO, tous attendus, le spectre infrarouge de la planète a révélé la présence de SO_2, une molécule particulièrement intéressante, comme l'explique Daniel Rouan : *« Sa présence dans la haute atmosphère d'une planète témoigne sans doute que la photochimie est à l'œuvre. Le rayonnement de l'étoile casse des molécules qui se recombinent ensuite. Par exemple, la photolyse d'une molécule d'eau libère de l'oxygène qui se recombine avec le soufre. Cela ouvre la possibilité de former des molécules qui ne se trouvent pas dans l'atmosphère primitive de la planète. »*



NASA/ESA/CSA, A. CARTER (UCSC), THE ERS 1386 TEAM, AND A. PAGAN (STSCI)

L'exoplanète HIP 65426-b, image directe dévoilée en septembre 2022 dans 4 longueurs d'onde différentes de lumière infrarouge.

qu'elle se contracte, un peu comme une petite prune qui sèche. » L'âge estimé de VHS 1256b est de 150 millions d'années. L'objectif, derrière ces observations, est de comprendre le mécanisme de formation de telles planètes. *« Ces supergéantes gazeuses sont à la limite d'être des petites étoiles. On hésite donc entre deux modèles. Soit elles se forment par accrétion de planétésimaux, et grossissent peu à peu comme les planètes telluriques. Soit elles naissent d'un effondrement local du nuage de gaz, comme une étoile. Dans les deux cas, la température n'est pas la même : elle sera plus élevée en cas d'effondrement.* »

Trappist-1b n'aurait pas d'atmosphère

Si l'observation directe ne permet pas encore de voir des planètes de type Terre, la méthode des transits en revanche s'y prête bien. Parmi les cibles du JWST figure l'étonnant système Trappist-1, composé de sept planètes telluriques (un record pour le moment) à 40 années-lumière de nous, dans la constellation du Verseau. Un premier résultat concernant Trappist-1b, la plus proche de son étoile, a été publié dans *Nature* le 27 mars. D'une taille comparable à la Terre, cette planète semble dépourvue d'atmosphère, selon les mesures du JWST. Il n'a toutefois pas pu constater *de visu* cette absence. Il s'agit d'une déduction réalisée à partir de la mesure de la température de la planète, comme l'explique Pierre-Olivier Lagage, astrophysicien au CEA et coauteur de la publication. *« Trappist-1b orbite à seulement 1,5 million de kilomètres de son étoile, en rotation synchrone. Autrement dit, elle présente toujours la même face à l'étoile, comme la Lune avec la Terre. Le côté jour est chauffé en permanence. En présence d'une atmosphère, des vents transporteraient de la chaleur du côté jour vers le côté nuit. Sans atmosphère pour redistribuer l'énergie, la température ne serait pas la même.* »

Grâce à des modèles numériques, les chercheurs ont calculé qu'en présence d'une atmosphère, la température atteindrait 126 °C, contre 226 °C sans. Il restait donc à mesurer cette température *in situ*. En guise de thermomètre, le JWST a utilisé l'instrument MIRI. *« Il était tout indiqué car dans cette gamme de températures, un objet émet principalement dans l'infrarouge moyen. En mesurant le rayonnement juste avant que la planète ne passe derrière l'étoile, et présente sa face diurne, nous avons pu en déduire une température autour de 226 °C, correspondant donc à l'hypothèse "sans atmosphère"* », conclut Pierre-Olivier Lagage.

Des résultats concernant la planète suivante par ordre d'éloignement de l'étoile, Trappist-1c, sont attendus juste pour l'été. En s'éloignant de l'étoile, une naine rouge, la probabilité de trouver des atmosphères devrait augmenter. L'enjeu est d'importance car les naines rouges sont les plus abondantes de la galaxie. De faible masse et luminosité, elles disposent malgré tout d'une zone habitable où les conditions de températures permettent l'existence d'eau liquide. Mais ces pâles soleils sont très actifs, secoués de puissantes éruptions expédiant des flots de particules dans l'espace. L'étude du système Trappist-1 révélera si les atmosphères peuvent résister à de telles fureurs, condition *sine qua non* avant même de se poser la question de la présence de vie. ■

DAVID ELBAZ
ASTROPHYSICIEN

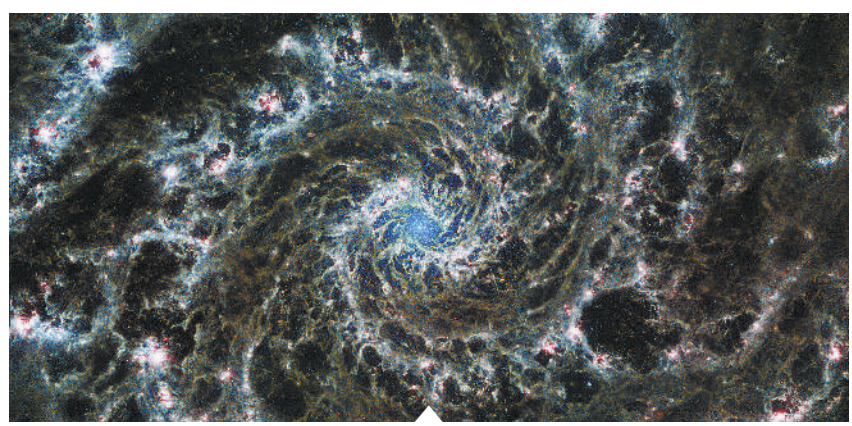
« Nous sommes revenus à l'époque des grands explorateurs »

Le directeur scientifique du département d'astrophysique du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) détaille les succès techniques et scientifiques du télescope spatial James-Webb.

Que retenez-vous de cette première année d'observations du télescope spatial James-Webb (JWST) ?
Le JWST, c' est d'abord une série de succès techniques. Succès du lancement, avec un tir tellement précis vers le point de Lagrange L2 qu'il a permis d'économiser du propergol. De 5 ou 10 ans, la durée de vie du télescope passe à 26 ans, selon les dernières estimations. Succès des instruments ensuite, qui fonctionnent tous et dans toutes les gammes de fréquence. On peut d'ores et déjà affirmer que le JWST est bien taillé pour atteindre ses objectifs, et qu'il produit des résultats à une vitesse incroyable. Nous avons dépassé la distance de la galaxie la plus lointaine, détecté des molécules encore jamais vues dans l'atmosphère des exoplanètes, caractérisé des nuages moléculaires…

Des résultats ont été annoncés dans les semaines qui ont suivi les premières images. C'est très rapide en science...
Au début, il y a eu une course à l'effet « whaou ! », avec des annonces un peu précipitées. C'est un peu normal avec un nouvel instrument. Elles ont été corrigées par la suite, mais il semble bel et bien qu'il y ait des découvertes inattendues. D'une certaine façon, on peut dire que l'imprévu est déjà arrivé…

Quelles sont ces découvertes inattendues ?
Prenons les galaxies lointaines. Les premiers résultats montrent qu'elles sont 100 fois plus nombreuses, et bien plus lumineuses que prévu ! L'un de mes collègues a résumé cela en disant que *« nous en avons vu plus en quelques jours que ce que l'on espérait voir en un an »*. Leur analyse spectroscopique s'est aussi révélée très riche. Un spectre, c'est le code-barres d'une galaxie : on y lit la signature des molécules qui la composent. Les spectres enregistrés par le JWST regorgent de ces signatures. Lors des congrès, nos collègues qui les décryptent nous expliquent qu'ils sont comme face à un livre très épais dont ils n'auraient lu que quelques pages. Mais nous avons déjà accès à plein d'informations : quels types d'étoiles composent ces galaxies, quel est leur âge… Des données dont nous ne disposions que pour les galaxies proches. Et qu'avons-nous découvert ? Prenons GNz-11, la galaxie la plus lointaine connue jusqu'à l'avènement du JWST. Nous savons désormais qu'elle abrite un quasar, un trou noir supermassif. Et la plupart de ces galaxies lointaines observées en possèdent un, ayant atteint sa masse finale. Que les trous noirs supermassifs soient si nombreux, si tôt dans l'Univers, bouleverse nos théories sur leur formation.



ESA/WEBB, NASA & CSA, J. LEE AND THE PHANGS-JWST TEAM

La galaxie « du fantôme » (M74). « Nous voyons ici la complexité en train de naître. »

DIDIER GOUPY/SIGNATURES

> « Que les trous noirs supermassifs soient si nombreux, si tôt dans l'Univers, bouleverse nos théories sur leur formation »

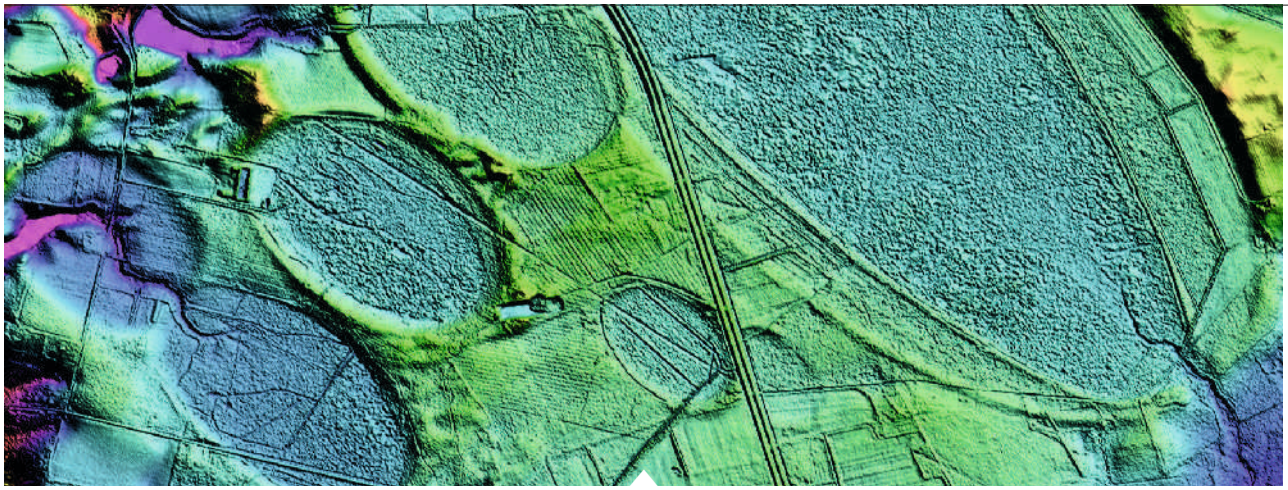
De quelle façon ?
La théorie dominante décrit un univers jeune peuplé d'étoiles gigantesques, allant jusqu'à 1000 masses solaires (Ms). Selon certains modèles, une telle étoile s'effondre en un trou noir de 1000 Ms environ. Ce trou noir va croître en avalant la matière autour de lui. Mais cela prend du temps pour passer de 1000 Ms aux millions ou milliards de Ms d'un trou noir supermassif. Ça ne colle pas avec leur précocité. D'autant plus qu'ils sont très nombreux. Il faut sans doute envisager une autre hypothèse : la formation directe de trous noirs, sans passer par la case « étoile ». D'immenses nuages de gaz s'effondrent sur eux-mêmes, accouchant de trous noirs de 100 000 à un million de Ms, qui fusionnent ensuite entre eux. Cela reste à confirmer, mais c'est la preuve que le JWST fait déjà bouger les lignes…

Et que nous apprennent d'autre toutes ces galaxies lointaines ?
Résumons : elles sont nombreuses, de petite taille, très lumineuses, et parfois dotées d'un trou noir en leur centre. L'Univers jeune était donc très performant pour former des étoiles, des trous noirs, des objets compacts à grande vitesse. Nous essayons maintenant de comprendre les mécanismes à l'œuvre. Cela nous oriente vers l'hypothèse des filaments galactiques, sur laquelle nous travaillons dans mon laboratoire. Ce sont d'immenses structures reliant les galaxies et leur apportant la matière pour croître, un peu comme des cordons ombilicaux. Selon les simulations numériques, ce sont de bons candidats pour expliquer la formation accélérée des galaxies. C'est aussi compatible avec une autre découverte du JWST : le fait que les galaxies forment très tôt leur disque et leurs bras spiraux. Mais encore une fois, nous n'en sommes qu'au début. Le second cycle d'observations qui commence va scruter d'autres zones de l'Univers afin d'y recenser d'autres galaxies jeunes, et constituer des échantillons statistiques valables. Il faut s'assurer que les caractéristiques que nous leur connaissons pour l'instant sont les mêmes partout dans l'Univers.

Dernier ouvrage paru : *Les dix mille et une nuits de l'Univers. La danse du cosmos*, Odile Jacob, 2022.

Qu'est-ce qui vous a particulièrement ému, hors de votre champ de recherche ?
Je pense à cette image extraordinaire de la galaxie « du fantôme » (M74), prise par la caméra MIRIm développée au CEA. Les couleurs que l'on voit sont rayonnées par des molécules complexes, des hydrocarbures aromatiques polycycliques, qui pourraient être les briques à l'origine de la vie. Il est en effet possible que la vie ait commencé par un processus de complexité chimique croissante dans l'espace interstellaire. En contemplant cette image, nous voyons ainsi la complexité en train de naître, et peut-être les premières étapes qui conduiront à la vie… C'est-à-dire nous. Je trouve cela d'une grande poésie.
Enfin il y a les exoplanètes. Le JWST capte directement leur lumière et analyse leur atmosphère, y compris des planètes rocheuses, avec beaucoup de facilité. Bientôt nous aurons accès aux planètes en zone habitable. Et cette quête exaltante ne fait que commencer, elle se poursuivra au-delà du télescope avec des instruments comme le satellite Ariel (projet européen prévu pour 2029) ou le l'E-ELT (Extremely Large Telescope au Chili). Cela m'évoque le temps des explorateurs qui parcouraient les mers pour explorer d'autres terres. Maintenant nous découvrons d'autres terres, mais elles sont extraterrestres. D'une certaine façon, c'est l'époque de Christophe Colomb qui revient. ■

Propos recueillis par F. N. @ fnicot07



NORTH CAROLINA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION

L'hydrogène est présent à l'état naturel dans le sous-sol terrestre (ici des émanations dans les Carolina Bays, États-Unis). Il peut également être produit à partir d'énergies renouvelables, éolien, solaire ou hydraulique, qui émettent peu de gaz à effet de serre.

SWNS/ABACAPRESS.COM

La généralisation de l'utilisation de la pile à combustible alimentée par de l'hydrogène dans le transport routier permettrait d'accélérer la décarbonation du secteur (ici un camion Tewa, au Royaume-Uni)

JAIME REINA/AFP

Les panneaux photovoltaïques (ici à Llosa sur l'île de Majorque, en Espagne) sont une des trois sources d'électricité, avec les éoliennes et les centrales hydrauliques, qui permet de fabriquer de l'hydrogène vert.

Hydrogène vert

Révolution annoncée dans l'industrie et les transports

Les aides européennes et nationales se multiplient pour développer une filière d'hydrogène « vert » issu de l'éolien, du solaire et de l'hydraulique, des sources d'électricité qui émettent très peu de gaz à effet de serre. L'enjeu est de taille : transformer les secteurs de l'industrie et des transports, trop dépendants encore des énergies fossiles. Plusieurs méthodes de production sont à l'étude.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau **et Fabrice Nicot** @fnicot07

Après des décennies de faux départs, l'hydrogène est en train de se faire une place dans le domaine de l'énergie. La promesse d'une molécule non polluante *« qui ne rejette que de l'eau »* émerge, induisant une transformation radicale de l'industrie et des transports, deux secteurs où le sevrage du pétrole, du charbon et du gaz naturel est le plus compliqué. Car le graal en passe d'être atteint, c'est l'hydrogène « vert » issu de l'éolien, du solaire et de l'hydraulique, des sources d'électricité qui émettent très peu de gaz à effet de serre. Pionnier du secteur, l'industriel français Air liquide prédit ainsi qu'en 2050, l'hydrogène couvrira 22 % des besoins mondiaux.

La plus petite et légère molécule de l'Univers n'est pas une inconnue pour les industriels. Air Liquide a été créée en 1902, et en 2019 elle a permis à la France de produire 890 000 tonnes d'hydrogène pour satisfaire les besoins de la production d'ammoniac (pour les engrais chimiques), du raffinage des produits pétroliers, des cokeries et de l'industrie chimique. Mais cet hydrogène est « gris » : il provient du vaporeformage du gaz naturel. Selon les bilans carbone de l'Agence de la transition écologique (Ademe), la fabrication d'un kilo d'hydrogène

INFRASTRUCTURES

Voiture à hydrogène cherche réseau désespérément

La voiture à hydrogène utilise une pile à combustible qui transforme l'hydrogène stocké dans des réservoirs en électricité. Cela permet d'obtenir une voiture électrique avec une autonomie voisine de celle des thermiques, à partir d'un plein de H_2 de quelques minutes à la pompe… À condition d'en trouver une. Si l'Union européenne promet un déploiement massif d'ici à 2030, l'association H2mobile ne recense que 42 stations sur tout le territoire, et certaines ne sont pas encore en service… En attendant un réseau de distribution à la hauteur, les principaux acteurs majeurs du marché (Toyota, Honda, Hyundai…) se diversifient vers la mobilité lourde (camions, bus, trains, bateaux), un marché davantage porteur, car il subit moins la concurrence des batteries qui ne sont pas adaptées. Dans une logique de « pièces détachées », ils proposent aux industriels du secteur leur savoir-faire en matière de pile à combustible, réservoirs, circuit de distribution d'hydrogène… Sinon, il faut regarder du côté des flottes d'entreprises, plus faciles à ravitailler. La société de taxis Hype poursuit son développement avec 300 véhicules en Île-de-France, et vise 700 (des Toyota Mirai) d'ici à la fin de l'année. Les constructeurs français misent pour l'instant sur les utilitaires. **F. N.**

GILLES ROLLE/REA

◄ **Seules 42 stations de recharge** existent sur le territoire français, dont certaines ne sont pas encore en service.

génère ainsi 11,1 kg de CO_2. À comparer avec les 0,70 kg de CO_2 généré par électrolyse à partir de l'éolien et 2,58 kg avec le photovoltaïque. *« À partir de la consommation actuelle, il est évident que l'hydrogène vert doit d'abord se substituer aux utilisations présentes et gagner d'autres secteurs de l'industrie lourde très émetteurs de gaz à effet de serre comme la sidérurgie »*, table Philippe Boucly qui représente le distributeur GRTgaz au conseil d'administration de France Hydrogène, l'association qui regroupe les principaux acteurs français du secteur. Celle-ci estime que l'Hexagone produira plus d'un million de tonnes d'hydrogène vert en 2030, à 80 % brûlés dans l'industrie et à 20 % dans le transport routier. La voiture individuelle n'est clairement pas une priorité *(lire l'encadré ci-dessus)*.

Les acteurs du secteur voient se déverser des aides qu'ils n'auraient jamais osé espérer il y a seulement trois ans. Pour l'hydrogène, la manne la plus récente est le feu vert de la Commission européenne donné, le 15 juillet 2022, à un « projet important d'intérêt européen commun » (Piiec) de 5,4 milliards d'euros d'aides visant à soutenir l'innovation mais aussi les premiers développements industriels. Ce fort soutien s'ajoute aux annonces de subventions faites en Allemagne pour 8 milliards d'euros, et en France pour 7 milliards d'ici à 2030 avec trois priorités : la décarbonation de l'industrie lourde, le développement de l'hydrogène dans le transport ferroviaire, maritime, fluvial et terrestre, et l'aide à la recherche. Parmi les Piiec, on trouve par exemple le passage de l'usine sidérurgique Arcelor-Mittal de Dunkerque du coke à l'hydrogène, prévu pour 2027 grâce à la technologie de la réduction directe du fer.

Des piles à hydrogène pour faire rouler des trains

Hydrogène de France (HDF Energy) est aussi candidat au Piiec. Le 24 février, cette entreprise, créée il y a dix ans, a posé la première pierre de sa future usine de construction de piles à hydrogène de forte puissance à Bordeaux. Ces piles de 1,5 mégawatt visent le marché des locomotives hybrides diesel/électrique, des ferries tels ceux qui font la liaison entre les ports méditerranéens et la Corse, et le stockage de l'électricité produite par les énergies renouvelables. Un marché mondial potentiel de plusieurs dizaines de milliers d'unités. Aujourd'hui, les constructeurs de piles à combustible sont focalisés sur des puissances de 5 kilowatts (kW) qui commencent à équiper les premières voitures et camions à hydrogène. *« Mais nous visons la décarbonation des transports lourds qui ne peuvent être électrifiés »*, revendique Damien Havard, P-DG de HDF Energy. L'entreprise est aujourd'hui à la tête d'un portefeuille d'une dizaine de réalisations au Mexique, en Guyane fran-

FRANK RUMPENHORST/DPA/ABC/ANDIA.FR

Le Coradia iLint, premier train de passagers au monde à fonctionner avec une pile à hydrogène, remplace peu à peu les locomotives diesel en Allemagne.

çaise, dans les Caraïbes, en Afrique du Sud et en Indonésie.

Actuellement, HDF Energy construit des piles à combustible selon ses besoins et est donc son premier client. La technique est simple : *« Il s'agit d'empiler dans un même conteneur les "stacks", assemblages de cellules de 5 kW que nous achetons aux actuels fabricants comme le canadien Ballard ou l'anglais Rolls-Royce,* explique Hanane El Hamraoui, directrice industrielle de HDF Energy. *La plus-value que nous apportons, ce sont les 40 000 composants — câblage, climatisation, pompes et vannes, intégration informatique — qui vont coordonner le travail de ces petites unités.* » L'encombrement des piles est équivalent à un conteneur standard du commerce maritime. Ce qui est bien plus volumineux qu'un moteur diesel de locomotive, mais a l'avantage de n'émettre que de l'eau et d'éviter la combustion de pétrole.

En France seulement, un millier de locomotives de fret sont hybrides électricité/diesel. HDF Energy s'est ainsi rapproché de l'opérateur Captrain pour amorcer la décarbonation du fret ferroviaire. Les trains à hydrogène commencent à être utilisés sur des lignes régulières. Le 24 août 2022, le constructeur Alstom a livré 14 locomotives destinées à remplacer des tracteurs diesel sur des trajets non électrifiés de la région de Hambourg (Allemagne). 2500 à 3000 trains allemands pourraient à terme rouler avec des piles à combustible. Dans le maritime, ce sont les ferries qui sont privilégiés car leurs trajets sont courts et réguliers. Le volume d'hydrogène nécessaire pour traverser les océans serait trop important.

Mais c'est surtout dans les réseaux électriques que HDF Energy met beaucoup d'espoir. À Los Cabos, au Mexique, une centrale solaire au sol de 22 mégawatts (MW), en cours de construction, sera reliée à des piles à combustible pour stocker l'énergie produite. Chaque projet de HDF Energy répond à la même idée : compenser l'intermittence de la production des énergies renouvelables en utilisant l'électricité produite en excès par les éoliennes et les panneaux photovoltaïques pour produire par hydrolyse de l'hydrogène que l'on peut stocker dans des réservoirs et restituer la nuit ou pendant les périodes sans vent. GRTgaz poursuit le même objectif avec son projet « Jupiter 1000 ». Basée à Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône), cette unité pilote teste le procédé de méthanation. *« L'énergie produite en excès par des éoliennes nourrit des électrolyseurs pour produire de l'hydrogène que l'on peut injecter directement dans le réseau de gaz ou bien que l'on peut transformer en méthane en le faisant réagir avec du CO_2 acheminé depuis les cheminées d'une usine voisine »*, développe Anthony Mazzenga, directeur du pôle gaz renouvelable et hydrogène chez GRTgaz. Jupiter 1000 produit ainsi du « e-méthane » depuis juillet 2022.

Les « e-fuel » pourraient alimenter les actuels moteurs thermiques, une solution quasi neutre pour le climat

Des carburants fabriqués avec de l'électricité décarbonée

Ce procédé intéresse vivement l'industrie automobile allemande qui y voit le moyen de sauver le moteur thermique. Ainsi, le 28 février, l'Allemagne a indiqué vouloir s'abstenir lors du vote final sur l'interdiction de vente de véhicules à essence et diesel neufs en 2035 dans l'Union européenne, sauf si une place sur le marché était laissée pour les moteurs thermiques alimentés par les « e-fuel ». Le constructeur Porsche vient de lancer sa première usine pilote de production au Chili, un pays choisi pour ses capacités importantes de production d'électricité d'origine éolienne. *« Il y a actuellement plus de 1,3 milliard de véhicules à moteur thermique dans le monde,* argumente Michael Steiner, membre du comité exécutif de recherche et développement chez Porsche. *Nombre d'entre eux rouleront toujours dans les décennies à venir et le e-fuel offre à leurs propriétaires actuels une alternative quasiment neutre pour le climat.* »

Ces carburants de synthèse sont fabriqués à partir d'électricité renouvelable servant à produire de l'hydrogène. La molécule subit deux traitements. Combinée avec de l'azote selon la réaction Haber-Bosch, elle produit de l'ammoniac qui pourrait être envisagé comme carburant pour le transport maritime. Puis au contact de monoxyde de carbone (CO) obtenu à partir de CO_2, cet ammoniac forme un gaz de synthèse que l'on peut transformer en kérosène

ou essence, selon les besoins. Si le procédé Haber-Bosch est couramment utilisé dans l'industrie, la phase d'électrolyse de l'eau se fait, elle, à un coût extrêmement élevé. C'est sur cette étape que portent les efforts de réduction des besoins en énergie et des coûts. Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) travaille notamment sur les électrolyseurs à haut rendement qui traitent l'eau sous forme de vapeur.

Le e-kérosène, une solution pour le secteur aéronautique

Les analyses de cycle de vie (ACV) menés par l'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (Ifpen) sur des véhicules similaires d'une durée d'utilisation de 150 000 kilomètres révèlent que les e-fuel ont un avantage certain en émissions de gaz à effet de serre sur les voitures électriques plombées par le mauvais bilan de leurs batteries. En revanche, les conclusions sont tout autres en matière de rendement énergétique. Avec 20 kilowattheures (kWh) d'électricité utilisée directement dans une batterie, un conducteur effectue 100 km ; pour 20 kWh d'hydrogène, 36 km ; alors que les 20 kWh contenus dans un litre de e-fuel permettent de ne parcourir qu'à peine 20 km. Mais une fois ces problèmes de rendements de conversion réglés, outre la voiture, le e-kérosène pourrait constituer une solution climatique pour le secteur aéronautique. La Commission européenne prévoit qu'en 2030, l'aviation civile européenne devra utiliser 350 000 tonnes de e-kérosène, et 2,35 millions de tonnes en 2035. Dernier coup de pouce : le 26 avril, la Commission et le Parlement européen se sont accordés pour atteindre 70 % d'énergie renouvelable dans les avions de ligne dont l'hydrogène et les e-fuel qui en découlent. Le signal de départ est donné. ■ **L. C.**

Les voies vertes de la production d'hydrogène

L'hydrogène est principalement produit à partir d'énergies fossiles, mais ces procédés polluants devraient céder la place à des méthodes de production décarbonée, allant de l'électrolyse, à l'imitation de la photosynthèse ou la valorisation de la biomasse.

La révolution de l'hydrogène est en marche, mais elle devra se verdir pour avoir un impact réel sur la lutte contre le changement climatique. *« En 2022, l'Union européenne a fixé comme objectif de produire 10 millions de tonnes d'hydrogène, à partir d'énergie renouvelable ou bas carbone, sur le sol européen d'ici à 2030, et d'en importer 10 autres millions »*, souligne Julie Mougin, en charge des technologies hydrogène au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Cela revient à multiplier environ par 100 la production d'hydrogène décarbonée en Europe, sachant que seulement 0,1 % de l'hydrogène du produit est « vert », plus de 90 % étant extraits des énergies fossiles. Autant dire que la marche est haute, mais il existe plusieurs voies pour y parvenir.

1 L'électrolyse de l'eau

Le procédé d'électrolyse, qui permet de produire de l'hydrogène en décomposant des molécules d'eau, est connu depuis le XIXe siècle. *« Il reste le plus efficace à l'échelle industrielle et il le restera sans doute pour les dix prochaines années »*, affirme Olivier Sala, vice-président de la recherche et de l'innovation chez Engie. La plupart des électrolyseurs industriels sont de type « alcalins ». Deux électrodes séparées par une membrane sont plongées dans un électrolyte conducteur, constitué de potasse ou de soude caustique. Le dihydrogène (H_2) est produit à la cathode (-), du dioxygène (O_2) à l'anode (+). Ils sont les héritiers d'une technologie centenaire dont le principal point faible est le rendement. *« Mais la recherche-développement est très dynamique,* note Olivier Sala. *D'autres types d'électrolyseurs sont à l'étude. Nous ne sommes clairement pas au bout des possibilités de cette technologie.* »

L'électrolyse par membrane échangeuse de protons (PEM) figure parmi les alternatives aux électrolyseurs alcalins les plus abouties. Elle utilise une membrane polymère qui joue à la fois le rôle de séparateur de gaz (O_2) et (H_2) et d'électrolyte. L'hydrogène produit est d'une grande pureté, avec des électrolyseurs plus compacts (car fonctionnant à des courants plus élevés) et plus

NESTE

Implanté dans une raffinerie à Rotterdam (Pays-Bas), l'électrolyseur à haute température du projet européen Multiplhy va générer à grande échelle de l'hydrogène produit à partir d'eau sous forme de vapeur.

faciles d'entretien que les alcalins… C'est aussi un électrolyseur pouvant démarrer rapidement, alors qu'il faut une heure à un électrolyseur alcalin pour atteindre son plein régime. Cela en fait un partenaire idéal des énergies renouvelables (éolien, solaire), par nature intermittentes. En revanche, les coûts de fabrication restent importants, et sa durée de vie plus courte que les alcalins. Pour gagner en compétitivité, il faudra diminuer le prix des électrodes (en platine ou en iridium) et des membranes perfluoro-sulfonées (PFSA). Mais selon un rapport de l'ONG International Council on Clean Transportation de 2020, le kilogramme d'hydrogène produit ainsi devrait passer de 10 euros à moins de 5 euros en 2030, se rapprochant des objectifs fixés par la Commission européenne de moins de 3 euros le kilogramme d'hydrogène « vert ». Avec les électrolyseurs alcalins, le coût se situe aujourd'hui entre 4 et 6 euros. À un stade de développement moins avancé, l'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température n'en est pas moins prometteuse, selon Julie Mougin. *« Le rendement d'une électrolyse à 700 ou 800 °C est de l'ordre de 84 %* [quantité d'énergie que fournit l'hydrogène produit par rapport à la quantité d'énergie nécessaire pour le fabriquer], *contre 60 à 70 % pour les autres techniques. Cela s'explique par le fait qu'il faut moins d'énergie pour casser une molécule d'eau lorsqu'elle est sous la forme vapeur que liquide.* » Toutefois, ce rendement ne prend pas en compte l'énergie nécessaire pour vaporiser l'eau. *« Il est donc indispensable de disposer d'une source de chaleur à proximité. Elle peut provenir de la géothermie, des réacteurs nucléaires ou encore de divers processus industriels (aciéries, cimenteries, raffineries)* ». Un démonstrateur de cette technologie a été installé en avril à Rotterdam (Pays-Bas) dans le cadre du projet européen Multiplhy. Construit dans une raffinerie par la société Sunfire, en collaboration notamment avec le CEA et Engie, il devrait produire 60 kg d'hydrogène par heure à partir de 2,6 mégawatts (MW) d'électricité. *« Compte tenu de son haut rendement, cette technique pourrait ramener le coût du kilogramme d'hydrogène à 2 euros, sur la base d'une électricité à 40 euros le MWh* », conclut Julie Mougin.

2 L'hydrogène naturel

À la mi-mars, dans le Nebraska (États-Unis), a été inauguré le premier puits destiné à l'exploitation d'hydrogène naturel. Ce projet lancé par Natural Hydrogen Energy, une société américaine en partenariat avec la société australienne HyTerra, marque peut-être l'aube d'une nouvelle ère que d'aucuns comparent à celle du pétrole, au début du XXe siècle. Et pourtant, le sujet reste assez confidentiel. *« Les principaux acteurs sont très discrets,* remarque Élodie Le Cadre, responsable scientifique chez Engie. *L'enjeu est vraiment immense. Il est difficile d'établir des estimations fiables, mais l'hydrogène naturel pourrait couvrir l'ensemble de nos besoins.* »

Il existe plusieurs mécanismes naturels susceptibles de produire de l'hydrogène, mais le plus connu résulte de réactions d'oxydoréduction entre l'eau et des minéraux ferreux contenus dans certaines roches (olivine, pyroxène), en présence de chaleur (géothermie). L'hydrogène généré remonte ensuite à tra-

vers les roches soit pour s'échapper à la surface par des fissures, soit pour rester prisonnier en profondeur dans des roches réservoirs. « *Le gaz est produit en permanence, on peut parler d'énergie renouvelable. Et sa production ne génère pas de CO_2* », note Olivier Sala. Mais cette manne, reconnue depuis seulement une dizaine d'années, ne se livre pas facilement. Les mécanismes de piégeage conduisant à une accumulation d'hydrogène sont des secrets jalousement gardés, encore au stade exploratoire. D'ailleurs, le puits du Nebraska était déjà à l'arrêt mi-avril, confronté à des difficultés techniques. En revanche, l'identification des zones de production progresse. En France, plusieurs sites ont été repérés, dans les Pyrénées-Atlantiques, la Drôme, ou encore en Côte-d'Or. Engie, au travers d'un projet collaboratif avec notamment la start-up française 45-8 Energy, le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et l'université de Pau, évalue actuellement le potentiel de l'hydrogène naturel de la région Nouvelle-Aquitaine, ainsi que de l'hélium naturel, un gaz souvent associé à l'hydrogène dans le sous-sol.

ÉQUIPEMENT

Le réseau de distribution commence à se structurer

Les industriels gaziers ont déjà la tête à l'étape suivante du développement de l'hydrogène : la distribution. Il va s'agir en effet de fournir en continu l'hydrogène à des usines très gourmandes. Pour un gaz très léger, rien de mieux que les tuyaux sous pression. Six projets baptisés « vallées de l'hydrogène » sont ainsi en développement en France. Le plus mature est MosaHYc (pour « Moselle Sarre Hydrogène conversion »). Il s'agit de convertir deux canalisations de gaz naturel au transport d'hydrogène pur pour alimenter les trains, bus, poids lourds et voitures dans une région transfrontalière au trafic routier très dense.
Les projets de Dunkerque ou du Havre sont plus tournés vers l'industrie.
Au niveau international, le projet H2MED, annoncé en janvier, prévoit le développement d'un pipeline sous-marin entre Barcelone et Marseille pour acheminer vers l'Europe du Nord 2 millions de tonnes d'hydrogène par an d'ici à 2030 (soit 10% de la consommation européenne à cette échéance) produites en Espagne et Portugal, voire au Maroc, où vent et soleil sont plus abondants. GRTgaz est chargé du développement de la connexion entre Marseille et l'Allemagne.
L'équipement des infrastructures routières va également débuter. Le 28 mars, les États de l'Union européenne se sont mis d'accord sur le déploiement des bornes de recharge le long des autoroutes. Ainsi, une station hydrogène sera disponible tous les 200 kilomètres pour refaire le plein d'ici à 2030 ainsi que dans les 424 plus grandes agglomérations européennes. Les stations de recharge devront avoir une capacité journalière d'une tonne d'hydrogène pour éviter les pénuries.
Les travaux de déploiement doivent commencer en 2027. Les opérateurs devront s'assurer que la production soit la plus locale possible pour éviter des trajets trop importants de camions-citernes.
En 2025, 300 stations hydrogène destinées aux poids lourds devront être ouvertes. **L. C.**

Six régions industrielles vont bénéficier d'un réseau de distribution d'hydrogène.

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE CARTE: GRTGAZ

3 Les cellules photoélectrochimiques

L'énergie solaire, gratuite et inépuisable, semble la source idéale afin de fabriquer de l'hydrogène décarboné. Pour l'instant, la solution consiste à alimenter les électrolyseurs avec du courant issu de panneaux photovoltaïques. *« La recherche se concentre sur la mise au point de processus de plus en plus intégrés, afin de supprimer la surface prise par les panneaux solaires dans le cas des systèmes photoélectrochimiques. Voire convertir directement l'eau en hydrogène sans électrolyte ni circuit électrique dans le cas des systèmes photocatalytiques »*, résume Élodie Le Cadre. Et des solutions s'élaborent en laboratoire, comme le détaille Laurent Baraton, expert chez Engie. *« Nous travaillons à la mise au point de photoélectrodes qui produisent directement les électrons nécessaires à l'électrolyse à partir de la lumière du soleil. Mais il faut beaucoup d'énergie pour casser une molécule d'eau. Les matériaux semi-conducteurs susceptibles de fournir des électrons très énergétiques ne sont efficaces que s'ils capturent des photons eux-mêmes énergétiques, c'est-à-dire dans l'ultraviolet. C'est un domaine du spectre solaire où les photons qui nous parviennent sont peu nombreux. »*

Il s'agit donc de développer des matériaux sensibles à une palette un peu plus large de photons, en « mordant » sur le bleu du domaine visible. *« Nous étudions le comportement de divers semi-conducteurs, comme l'oxyde de titane, l'hématite ou encore le vanadate de bismuth ($BiVO_4$). Il faut mettre au point non seulement de bons convertisseurs lumière/électrons, mais aussi des matériaux avec une bonne tenue dans l'eau puisqu'ils sont plongés dans l'électrolyte, sous le soleil »*, détaille Laurent Baraton.

ENGIE

« Nous travaillons à la mise au point de photoélectrodes qui produisent directement les électrons à partir de la lumière du soleil »

Laurent Baraton, expert chez Engie

Un autre axe de recherche pour améliorer l'efficacité des dispositifs consiste à jouer sur la géométrie des photoélectrodes, grâce aux nanotechnologies. *« En structurant un matériau à l'échelle nanométrique, vous augmentez notamment sa surface utile* [où se déroule la conversion photons/électrons] *sans toucher à son volume, ce qui accroît l'efficacité globale du dispositif »*, avance Laurent Baraton. Pour l'instant, le rendement tourne autour de 5 à 6 % de l'énergie solaire convertis en énergie issue de l'hydrogène produit. *« Le seuil de viabilité fixé par le département de l'Énergie des États-Unis est de 10 %. C'est à notre portée en laboratoire. La principale difficulté sera de passer à l'échelle industrielle, en termes de coût et de durabilité. Il faudra sans doute une dizaine d'années pour cela »*, ajoute l'expert.

4 La pyrogazéification et la gazéification

Des procédés permettent d'obtenir de l'hydrogène à partir des déchets, ou de la biomasse. La pyrogazéification consiste à chauffer des végétaux, chiffons, bois de meubles à plus de 1000 °C dans une atmosphère à faible teneur en oxygène. On obtient ainsi du méthane et de l'hydrogène. Ces unités vont valoriser la part solide imputrescible des déchets ménagers et industriels. La filière se structure avec une quinzaine de sites pilotes recensés en France et le développement industriel est attendu pour les prochains mois. À Strasbourg, le procédé alimente ainsi les bus urbains en hydrogène. Cette technologie permet également de produire un coproduit, le biochar, un amendement riche en carbone permettant d'enrichir les sols et d'enfouir pour des siècles du CO_2 *(lire* S. et A. *n° 908)*.

La seconde voie est la gazéification hydrothermale. Il s'agit cette fois de déchets humides (la part humide des déchets ménagers, les lisiers, les boues de station d'épuration, les effluents organiques produits par les usines) que l'on comprime à 250-300 bars et que l'on chauffe entre 400 et 700 °C, là encore pour obtenir un gaz riche en méthane. Il faut ensuite ajouter une phase d'épuration pour obtenir de l'hydrogène. ■ **F. N.**

RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE

Le nucléaire peut-il produire de l'hydrogène vert ?

L'électricité d'origine nucléaire doit-elle faire partie des énergies permettant de labéliser l'hydrogène vert ? La question déchire les États européens, pro et antinucléaires, dont les deux principales puissances, la France qui relance son nucléaire et l'Allemagne qui vient de l'abandonner.
La position actuelle de la Commission européenne intègre bien les centrales futures, qui utilisent des technologies produisant peu de déchets radioactifs, ainsi que les petits réacteurs SMR en développement, mais pas la deuxième génération des EPR. Pour les centrales existantes, l'Allemagne a indiqué qu'elle considérerait comme vert l'hydrogène produit en France à partir de l'énergie nucléaire. L'Europe doit prendre une décision définitive d'ici à la fin 2023. L. C.

ORGANOÏDE Structure cellulaire en 3D cultivée à partir de cellules souches mimant de façon simplifiée les fonctions principales d'un organe.

INTELLIGENCE ORGANOÏDE (IO) Capacité d'organoïdes cérébraux connectés entre eux à émettre un signal interprétable en réponse à une information.

MODÈLE Organismes humains, animaux ou cellulaires sur lesquels sont réalisées les expériences scientifiques.

Vers des ordinateurs dopés aux neurones vivants

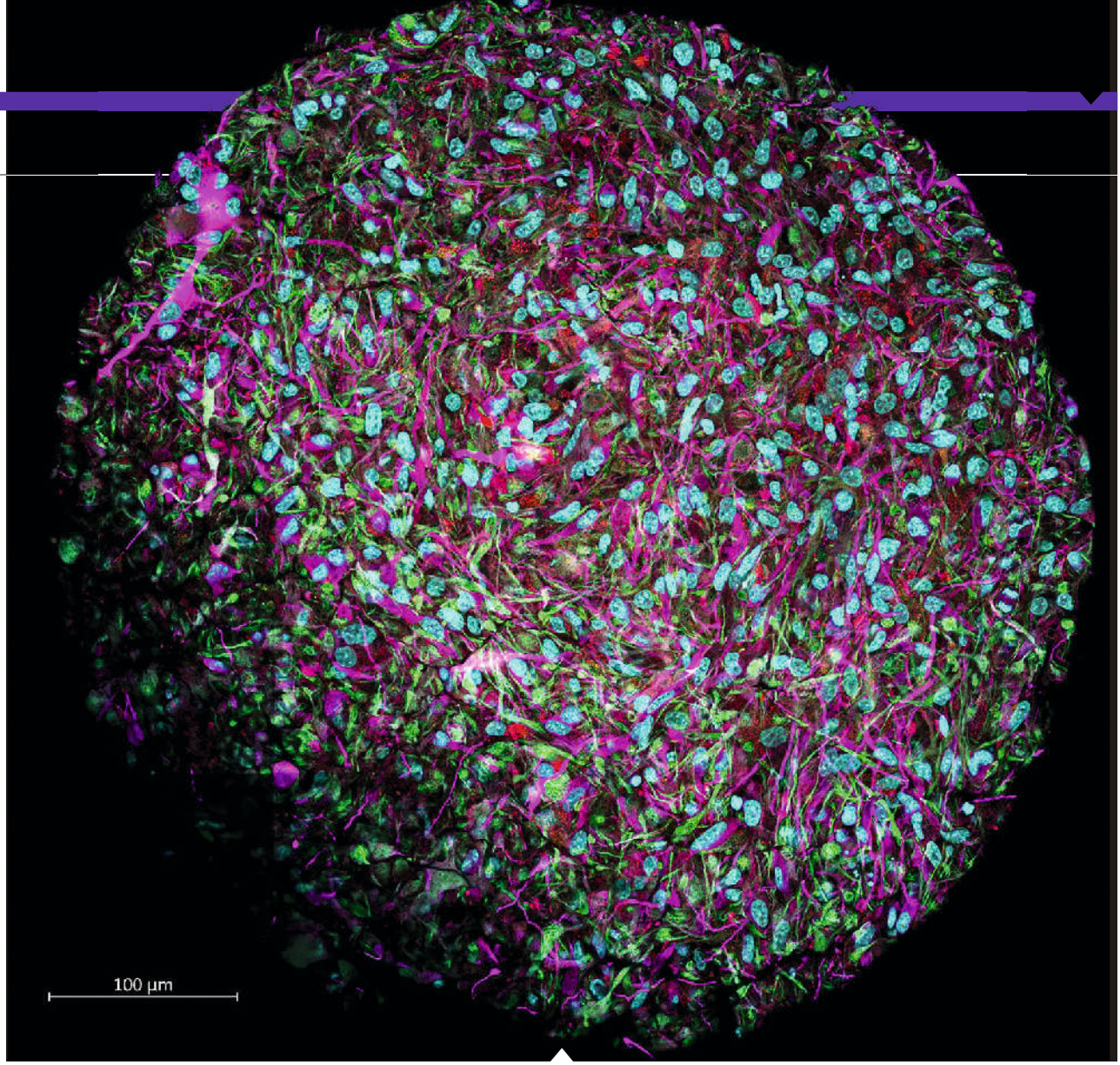
Des chercheurs américains misent sur les organoïdes cérébraux pour créer une nouvelle forme d'intelligence artificielle. Mais si les perspectives semblent révolutionnaires en médecine, les travaux sur l'« intelligence organoïde » se heurtent à de nombreux obstacles techniques et… éthiques.

Scientifiques du monde entier, contribuez au développement des premiers bio-ordinateurs ! C'est en substance l'appel lancé par une équipe de l'université Johns-Hopkins (États-Unis) qui ambitionne de mettre au point des machines dont les calculs seraient opérés… par des neurones vivants. Ce projet aux allures de science-fiction fait l'objet d'une série d'articles parus dans la revue *Frontiers of Science,* discutant l'émergence et les perspectives de cette nouvelle discipline baptisée « intelligence organoïde » (IO). Son principe repose sur un constat simple : à consommation énergétique égale, le cerveau humain s'avère bien plus efficace que les ordinateurs pour traiter des données. *« En 2013, le quatrième plus grand ordinateur du monde a mis quarante minutes pour modéliser une seconde de 1 % de l'activité cérébrale d'un humain »*, illustrent les auteurs. Certes, près de dix ans plus tard, en juin 2022, le superordinateur Enterprise Frontier (OLCF-5) de Hewlett Packard a dépassé la puissance de calcul estimée d'un cerveau humain, à savoir 1 exaflop, soit 100 000 fois plus qu'un MacBook d'Apple. *« Mais la différence d'efficacité est considérable : un cerveau humain pèse environ 1,4 kg et consomme 20 watts d'énergie, alors que Enterprise Frontier occupe 680 m² et consomme 21 mégawatts »*, pointe le neuroscientifique Rémi Quirion, scientifique en chef du Québec, dans un commentaire publié par la revue. Pourquoi dans ce cas ne pas s'appuyer sur les performances biologiques du cerveau pour créer une nouvelle forme d'intelligence artificielle ?

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC

« Un cerveau humain pèse 1,4 kg et consomme 20 watts, alors qu'un superordinateur occupe 680 m² et consomme 21 mégawatts »

Rémi Quirion, scientifique en chef du Québec

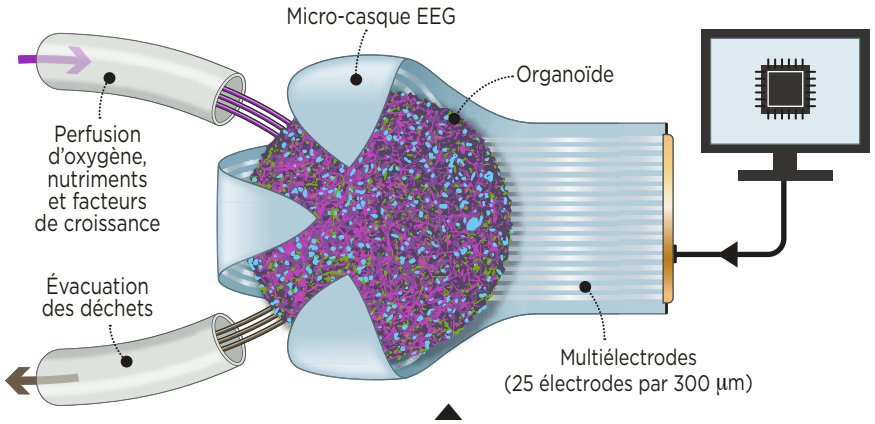


JESSE PLOTKIN/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY

Organoïde cérébral (image agrandie et colorée) avec neurones (rose), noyaux cellulaires (bleu) et cellules de soutien (rouge et vert).

Pour cela, les scientifiques comptent s'appuyer sur le développement des organoïdes cérébraux *(lire* S. et. A. *n° 898)*, de petites structures cellulaires tridimensionnelles, cultivées en laboratoire et capables de reproduire, en partie, l'activité cérébrale. Idéalement, ces petites boules de neurones et autres cellules de soutien seraient nourries par un système de canaux microfluidiques pour leur éviter la nécrose des tissus. Dans le même temps, des signaux électriques leur seraient envoyés par des puces de microélectrodes pour qu'ils opèrent les calculs ; avant que la réponse de l'organoïde ne soit renvoyée à la puce pour être alors interprétée par une intelligence artificielle. *« Puisque ces structures cellulaires peuvent théoriquement fonctionner comme un cerveau humain, les scientifiques de l'université Johns-Hopkins pensent que différents organoïdes mis en parallèle pourraient fonctionner aussi efficacement que notre cerveau »*, résument dans un autre article deux expertes de l'université de Pise (Italie). *« Il ne faut pas penser aux organoïdes cérébraux comme des "mini-cerveaux" »*, rappelle Lena Smirnova, chercheuse à l'université Johns-Hopkins et première auteure de l'appel à développer l'IO. *« Pour l'instant ces organoïdes ne sont pas vascularisés, ne possèdent ni microbiote ni système immunitaire ni barrière hémato-encéphalique* [filtre qui isole le cerveau du reste du corps pour le protéger]. *Bref, il manque beaucoup de choses pour parler d'un cerveau »*, abonde Bertrand Pain, directeur de recherche Inserm à l'Institut cellules souches et cerveau de Lyon. Reste qu'après une centaine de jours de maturation, les neurones contenus dans ces organoïdes sont bel et bien capables de lancer des signaux électriques. Mais loin de recréer la complexité d'un cerveau humain, l'objectif ici est plutôt d'obtenir de petites unités fonctionnelles, connectées les unes aux autres, mimant ses facultés d'apprentissage et de calcul.

Autre différence de taille, celle de l'apprentissage : *« À la naissance, nos connexions cérébrales sont très nombreuses, puis, au fil des interactions avec l'environnement, ces connexions*



Le micro-casque EEG dans lequel est inséré l'organoïde, alimenté en oxygène et nutriments, capte les signaux émis par ce dernier pour être transmis à des algorithmes.

diminuent et se rationalisent », rappelle Bertrand Pain. Comment mimer ce processus d'apprentissage du vivant chez un organoïde ? Et comment faire adopter à ces boules de neurones le comportement qu'on attend d'elles pour opérer les calculs complexes auxquelles elles seront soumises ? « *Certains scientifiques cherchent à évaluer l'apprentissage dans des cultures de cellules cérébrales, par exemple en entraînant des organoïdes cérébraux à contrôler les mouvements d'un robot ou à jouer au jeu vidéo Pong* », avance Rémi Quirion. À l'automne 2022 en effet, DishBrain, un organoïde cérébral cultivé par le Cortical Labs à Melbourne (Australie), a été connecté à ce jeu vidéo rudimentaire où deux barres doivent se renvoyer une balle jusqu'à ce qu'un des joueurs la rate, donnant le point à l'adversaire. Après quelques minutes d'échecs répétés, il était capable de déplacer la barre pour toucher la balle assez souvent pour que cela ne soit pas dû au hasard. Mais il la ratait tout de même très souvent. « *Incontestablement, il reste beaucoup de chemin à parcourir* », commente Rémi Quirion.

De fait, si les organoïdes émettent bien des signaux électriques, ils sont la plupart du temps « *erratiques et imprévisibles* » prévient Bertrand Pain. À l'université de Pise, les chercheuses italiennes Chiara Magliaro et Arti Ahluwalia se sont également posé la question : « *On ne sait pas si l'énorme variabilité des organoïdes cérébraux est attribuable à leur capacité à mimer la diversité et l'hétérogénéité des organismes vivants, ou s'ils sont tout simplement bruyants* [dans le sens d'instables et aléatoires] *et peu fiables* », pointent-elles ainsi. Loin de ce qui est attendu d'un ordinateur. Un autre obstacle devrait encore compliquer un peu les recherches. En effet, pour atteindre ses performances, notre cerveau s'appuie sur la communication entre plusieurs types de neurones et de cellules de soutien. « *Pour intégrer un signal, le cerveau utilise plusieurs zones aux caractéristiques biologiques potentiellement distinctes* », résume Bertrand Pain. Pour que les organoïdes intègrent des informations complexes à la manière de nos cerveaux, il faudrait

PERSPECTIVES

De grandes attentes pour la recherche médicale

« *D'ici à une dizaine d'années, l'IO devrait connaître de grandes avancées* », anticipe Lena Smirnova, première auteure du récent article dans *Frontiers in Science* sur l'intelligence organoïde (IO). Avec en première ligne les recherches pharmaceutiques, dans lesquelles les organoïdes de cerveaux permettront de tester l'efficacité et la toxicité de médicaments ou substances sur le cerveau humain. Puisque les organoïdes ne permettent pas de mimer un vrai cerveau humain, la simulation sera bien sûr imparfaite. « *Tous les modèles sont incorrects, mais certains sont utiles* », rétorque la chercheuse, citant le statisticien George Box. Les modèles animaux disposent d'un cerveau et d'un organisme complet, mais sont eux-mêmes loin de l'humain. Fabriqués à partir de cellules prélevées sur des patients, les organoïdes pourraient même devenir le premier modèle préclinique humain pour l'étude des pathologies neurodégénératives comme Alzheimer, de troubles du neurodéveloppement tels que l'autisme, ou des maladies psychiatriques associées à des facteurs génétiques comme la schizophrénie. Par rapport à de simples organoïdes isolés, l'IO devrait permettre l'étude de la mémoire, de l'apprentissage et de la cognition, ainsi que l'impact de la neurodégénérescence sur ces fonctions. Avec l'espoir que l'IO puisse peut-être, un jour, remplacer l'usage des modèles animaux.

JOHNS HOPKINS UNIVERSITY

Cultivés à l'université Johns-Hopkins (États-Unis), ces organoïdes cérébraux peuvent émettre des signaux électriques après une centaine de jours de maturation.

donc les complexifier en combinant plusieurs types d'organoïdes reflétant l'activité de telle ou telle zone cérébrale. C'est ce que le chercheur réalise dans son laboratoire, sous le nom d'« assembloïdes », dont les parties ne sont pas interchangeables et nécessitent de surcroît des conditions de culture différentes.

Pouvoir mesurer une éventuelle forme d'intelligence

En admettant que ces organoïdes montrent une forme d'intelligence, même rudimentaire, il faudrait encore pouvoir la mesurer. *« Une fois qu'on a stimulé l'organoïde et enregistré sa réponse, comment interpréter le signal ? »*, interroge Bertrand Pain. À cette question, Thomas Hartung, professeur à l'université Johns-Hopkins et membre du premier comité sur l'IO, répond que des outils sont en construction pour communiquer avec les organoïdes. *« Par exemple, nous avons mis au point un dispositif d'enregistrement/stimulation qui ressemble à un mini-capuchon EEG* [électroencéphalogramme] *entourant l'organoïde. »*

Si le chemin pour parler de véritable « intelligence organoïde » est encore long, d'autres voies peuvent être examinées. *« Il serait plus logique de fabriquer de meilleurs ordinateurs fonctionnant avec des sources d'énergie durable et possédant une architecture inspirée du cerveau humain »*, argumentent ainsi Chiara Magliaro et Arti Ahluwalia. Leur idée est de remplacer les réseaux de neurones numériques des intelligences artificielles actuelles par une modélisation numérique des neurones biologiques, tels qu'ils fonctionnent au sein d'organoïdes cérébraux. Et ainsi imiter la capacité de mémoire et d'apprentissage des réseaux neuronaux biologiques. Il serait également possible de *« remplacer les réseaux de neurones des ordinateurs par des réseaux de neurones biologiques »*, imagine de son côté Bertrand Pain. Les organoïdes seraient alors uniquement utilisés comme support de mémoire et de calcul, à la manière de puces particulièrement performantes et économiques. *« Ce serait une intelligence artificielle sur un support biologique, quelque chose de très différent de l'intelligence du vivant »*, précise-t-il. Mais Thomas Hartung n'en démord pas : *« Même si l'IO n'en est qu'à ses débuts, les travaux passés montrent que c'est possible. […] Lorsqu'elle deviendra un véritable outil, elle sera très différente des premiers pas que nous faisons actuellement. Je vois cela comme le séquençage des premiers gènes du projet du génome humain : la technologie de base est entre nos mains, et nous allons certainement apprendre beaucoup en chemin. »* Avec, s'ils réussissaient, des perspectives étourdissantes. Au-delà de leur puissance de calcul, ces IO pourraient aussi servir de support de test toxicologique ou pour la recherche médicale. Elles permettraient alors de mieux comprendre le fonctionnement des pathologies du cerveau et les effets des traitements. ■

Camille Gaubert
@CamilleGaubertb

JOHNS HOPKINS

« La technologie de base est entre nos mains, et nous allons certainement apprendre beaucoup en chemin »

Thomas Hartung, professeur à l'université Johns-Hopkins (États-Unis)

ÉTHIQUE

Des évaluations en fonction des progrès

Les organoïdes cérébraux sont loin d'avoir la taille, la structure et la complexité de vrais cerveaux. Dans ces conditions, « *je vois mal comment nous pourrions obtenir une conscience, dont nous ne comprenons d'ailleurs pas encore complètement les caractéristiques biologiques* », pointe Lena Smirnova, première auteure de l'article sur l'intelligence organoïde (IO) dans *Frontiers in Science*. Cet article prévoit malgré tout un dispositif d'évaluation de l'éthique des IO au fur et à mesure que le domaine avance. Mais la conscience n'est pas le seul problème éthique qui pourrait se présenter. Car dans le cas des applications médicales, les organoïdes pourraient dériver de cellules de patients donneurs, appuie l'éthicien Julian Kinderlerer dans la même revue. Dans ce cas, *quid* des droits du donneur sur les applications de l'organoïde ? Et si le système s'avère sensible et au moins partiellement humain, les droits de propriété peuvent-ils être appliqués ?, s'interroge-t-il.

KOPPERT BIOLOGICAL SYSTEMS

Un grand nombre de solutions naturelles existent pour protéger les cultures des ravageurs (ici « Aphidius colemani », une guêpe parasitoïde des pucerons) et faciliter la sortie des pesticides chimiques. Une démarche qui nécessite un changement de paradigme.

Biocontrôle

L'alternative aux pesticides est dans la nature

La Commission européenne souhaite réduire de 50 % les pesticides chimiques d'ici à 2030. L'utilisation d'insectes ou de micro-organismes contre les ravageurs des plantations est une solution prometteuse, mais sa mise en œuvre est parfois délicate.

Par Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

Savez-vous que le pire ennemi de la punaise verte *Nezara viridula*, tant redoutée des maraîchers pour sa faculté à provoquer par ses piqûres la chute des fleurs et la détérioration des fruits et légumes, est le tout petit hyménoptère *Trissolcus basalis*? Ce moucheron repère les plaques que forment les œufs de la punaise pour y pondre ses propres œufs. En moins d'une semaine, les petites sphères dorées prennent une couleur marron terne qui trahit le repas de la larve de *Trissolcus*. Une semaine de plus et un nouvel hyménoptère apparaît au détriment de la punaise. Ce minuscule parasitisme a été sacré « innovation 2023 » par les professionnels du Salon du végétal, qui a lieu tous les ans en janvier à Angers (Maine-et-Loire). La société Koppert y a présenté le conditionnement en carton de 5000 œufs de punaises parasités par l'hyménoptère. « *C'est une méthode préventive,* explique Adeline Infray, responsable marketing. *Il suffit de disposer les boîtes dans la culture un peu avant la période où les punaises pondent leurs œufs pour augmenter la population d'hyménoptères et ainsi favoriser le parasitisme des punaises.* »

13 %
La part des solutions de biocontrôle sur le marché global du phytosanitaire.

38 %
La part du biocontrôle sur le marché des insecticides.
(CHIFFRES 2021.)

Le procédé nommé Nezapar est l'une des dernières avancées du vaste domaine des produits de biocontrôle. Il répond à un véritable besoin. Avant le moucheron, les maraîchers n'avaient à leur disposition que des produits chimiques peu efficaces et aucune solution biologique. Les essais de lâchers répétés sur plusieurs semaines ont montré une diminution de 90 % des punaises. « *On n'éradique pas totalement le ravageur, mais*

on diminue nettement les dégâts », se félicite Adeline Infray.
La société, fondée par l'agriculteur néerlandais Jan Koppert en 1967, vient d'annoncer une autre innovation qui devrait faire parler d'elle en 2024, pour la betterave cette fois. Elle développe des techniques de diffusion de *Chrysoperla carnea*, un insecte de l'ordre des névroptères pour contrer le développement du puceron responsable de la jaunisse. Cette maladie incite les planteurs à exiger tous les ans une dérogation pour utiliser des semences enrobées de néonicotinoïdes — des substances interdites depuis le 1er septembre 2018 pour leur impact délétère avéré sur une vaste gamme d'insectes dont les abeilles. La « demoiselle aux yeux d'or », petit surnom de la chrysope, pourrait permettre au secteur betteravier de faciliter la sortie des pesticides chimiques.
Car c'est bien la fin d'une époque que viennent de décider les autorités européennes. Dans le cadre de sa stratégie « de la ferme à la fourchette », la Commission européenne propose aux États membres un objectif de réduction de 50 % des pesticides chimiques d'ici

RÉGLEMENTATION

Les promesses des fortifiants

Fortifier les plantes face à leurs agresseurs : tel est la promesse des préparations naturelles dites peu préoccupantes (PNPP). Légalisées par la loi agricole de 2014, elles sont aujourd'hui libres d'usage dans les champs et les jardins. Ainsi, les pyrèthres synthétisés par les fleurs des chrysanthèmes ont un effet neurotoxique dissuasif sur les insectes. Certaines substances de défense des plantes activent la production de protéines augmentant l'épaisseur des surfaces des feuilles. La loi fait la différence, parmi ces PNPP, entre les substances de base — comme le purin d'ortie —, qui n'ont pas besoin d'autorisation de mise sur le marché, et les substances naturelles à usage biostimulant (SNUB) qui, elles, doivent être évaluées.

NICOLAS BERTRAND / INRAE

VERBATIM

THIBAUT MALAUSA DIRECTEUR DE RECHERCHE À L'INRAE ET COORDINATEUR SCIENTIFIQUE DU CONSORTIUM PUBLIC-PRIVÉ RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT-INNOVATION SUR LE BIOCONTRÔLE

« Une nécessaire modification des habitudes alimentaires »

“Le succès du biocontrôle dépend principalement de modifications profondes du système agricole et alimentaire. Pour obtenir une protection des cultures respectueuse de la biodiversité tout en offrant des rendements qui satisfassent la demande alimentaire, il faudra diversifier les systèmes de culture : en associant plusieurs espèces cultivées, en plantant des haies, mélanges fleuris et autres infrastructures écologiques pour favoriser l'action des arthropodes et des micro-organismes résidents qui améliorent la santé des plantes, en semant des variétés résistantes, etc.
Ces changements nécessiteront davantage d'outils et de services pour que la complexité accrue ne soit pas synonyme de complications, charge mentale et risques inacceptables pour les agriculteurs. Ces modifications généreront des emplois attractifs et le défi sera alors de veiller à ce que les coûts de service ou de personnel restent compatibles avec une rémunération satisfaisante de l'agriculteur. Cela implique aussi que les coopératives et l'industrie agroalimentaire devront transformer leurs méthodes pour accueillir des récoltes plus diverses. Mais l'acteur principal de ce changement, c'est le binôme grande distribution-consommateur. C'est en modifiant les habitudes alimentaires, en augmentant la proportion de protéines végétales dans notre alimentation — pour diminuer les besoins en surfaces agricoles et donc éviter la course permanente au rendement — et en achetant des produits issus de pratiques agricoles hautement durables pour créer de la valeur à destination des agriculteurs et leur donner les moyens d'innover, que l'on rendra possibles l'essor du biocontrôle et la sortie des pesticides chimiques.”

Propos recueillis par L. C.

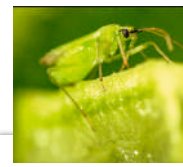
à 2030. Le Parlement européen est en train de débattre de cet objectif pour une adoption prévue à l'automne 2023. Les députés sont partagés entre, d'une part, ceux qui estiment que l'abandon des pesticides menacerait la rentabilité des exploitations et mettrait à mal la souveraineté alimentaire de l'Union européenne et, d'autre part, ceux qui plaident pour que le secteur agroalimentaire intègre leurs impacts sur la biodiversité, l'environnement et la santé humaine dans une approche « une seule santé ». Mais force est de constater que les démarches volontaires de réduction de la chimie — tels les plans Ecophyto en France — ont toutes échoué. Les volumes annuels utilisés stagnent autour de 350 000 tonnes en Europe, 60 000 à 80 000 tonnes en France. *« Ce constat fait émerger la nécessité d'un changement de paradigme, d'une démarche de rupture profonde pour aller vers des systèmes de culture innovants sans produits chimiques »*, estime Olivier Mora, ingénieur de recherche à la direction de l'expertise scientifique collective, de la prospective et des études de l'Institut national de recherche sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae).

Modifier la structure des paysages

C'est en effet tout un système agronomique qui va devoir évoluer. Les chrysopes auront par exemple besoin, à l'intérieur des champs de betteraves, de plantes refuges à fleurs, puisque les adultes se nourrissent de miellat. Cela implique de modifier les pratiques aujourd'hui simplifiées à l'extrême avec une seule plante occupant des centaines d'hectares sur d'immenses champs. Le biocontrôle gagnera en efficacité si la structure même du paysage évolue, avec des parcelles plus petites et des changements annuels de culture sur cinq ou sept ans, incluant des légumineuses qui enrichissent les sols en azote. *« On ne remplace pas un produit A chimique par un produit B de biocontrôle avec l'idée que l'efficacité sera la même,* prévient Denis Longevialle, directeur général de la branche française de l'IBMA, une association internationale des fabricants de biocontrôle. *Il faut aussi repenser globalement sa stratégie de protection des plantes, notamment en privilégiant les végétaux sauvages qui attirent les auxiliaires, ces insectes qui favorisent la santé des cultures.* »

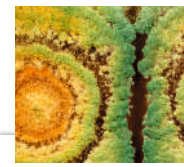
Il y a en l'espèce un exemple qui, depuis trente ans, montre que le contrôle naturel des ravageurs est possible : celui du maïs. En France, 100 000 hectares sur les 500 000 consacrés à cette culture tous les ans sont traités contre la pyrale, un petit papillon ravageur, par la diffusion dans les champs — aujourd'hui par drones — de minuscules hyménoptères, les trichogrammes dont les larves se nourrissent des œufs du papillon.

4 méthodes de biocontrôle et leur mode d'action



Macro-organismes
Insectes
Acariens
Nématodes

- Parasitisme
- Prédation



Micro-organismes
Espèces fongicides ou bactériennes

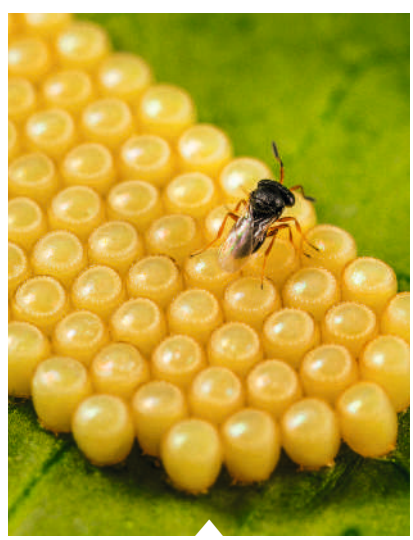
- Parasitisme
- Antibiose
- Compétition

Substances naturelles
Plantes
Algues
Minéraux

- Biocide
- Barrière physique
- Répulsion

Médiateurs chimiques
Composés volatils naturellement émis par un organisme

- Confusion sexuelle
- Piégeage



KOPPERT BIOLOGICAL SYSTEMS

L'insecte « Trissolcus basalis » est un parasitoïde des œufs de punaise verte.

KOPPERT BIOLOGICAL SYSTEMS

Plusieurs types de biocontrôle peuvent se combiner

« On distingue deux stratégies, détaille Xavier Fauvergue, directeur de recherche à l'unité de biologie des populations à l'Inrae. *La première, dite d'acclimatation, consiste à rechercher des prédateurs dans la région d'origine du ravageur. La seconde, dite de conservation, vise à augmenter les populations locales d'insectes bénéfiques pour les plantes cultivées.* » Mais l'utilisation des ennemis naturels des ravageurs des plantes n'est pas la seule arme du biocontrôle. *« Entre 1961 et 2021, 20 000 publications scientifiques ont décrit des méthodes de biocontrôle,* note Marc Bardin, chercheur à l'unité de pathologie végétale de l'Inrae Avignon. *Le vrai décollage date des années 1990 et rien qu'en 2020, plus de 2000 études ont été publiées.* » Elles explorent la possibilité de faire appel à des micro-organismes, des substances naturelles, et des médiateurs chimiques *(voir le tableau ci-dessus)*. Ces méthodes ne s'excluent

pas mais, au contraire, se confortent. La bonne combinaison sera à définir selon la saison, la météo, les qualités de sol ou encore la biodiversité végétale et animale proche. Plus les agriculteurs accumuleront d'expérience, plus le biocontrôle sera efficace.

Prenons l'exemple du carpocapse (*Cydia pomonella*), ce lépidoptère qui ravage les pommiers. La chenille du papillon pénètre dans les fruits par un petit orifice et creuse des galeries qui rendent les pommes impropres à toute consommation. C'est cet insecte qui explique que la pomme reçoit jusqu'à 30 traitements chimiques par saison. L'importance économique du fruit a provoqué d'intenses recherches tous azimuts. « *La stratégie de l'acclimatation a été tentée avec la recherche dans la région d'origine du pommier, l'Asie centrale, d'insectes prédateurs de* Cydia pomonella, raconte Xavier Fauvergue. *Mais on utilise aussi un virus, la carpovirusine, la confusion sexuelle — qui consiste à égarer les mâles en diffusant des phéromones femelles —, et même les filets à petites mailles qui constituent une barrière physique. Soit quasiment toute la gamme des actions de biocontrôle possible.* »

Des synergies pour améliorer la protection des plantes

Un nouveau champ de recherche est en train de s'ouvrir pour définir comment combiner ces stratégies. Les programmes d'études se concentrent aujourd'hui sur les synergies et les combinaisons qui permettraient d'améliorer la protection des plantes. Car il est toujours très difficile de comprendre ce qu'il se passe à l'échelle d'un végétal. Comme les animaux, les plantes sont entourées de milliards d'organismes qui influent sur leur santé. Ainsi, chaque centimètre carré de feuille abrite de 10 à 100 millions de microbes. Ces microbiotes, très différents selon qu'ils occupent les racines ou les feuilles, sont réunis au sein du terme générique d'« holobionte ». « *Les plantes vivent en interaction étroite avec un cortège de bactéries, champignons ou encore des protistes dont certains ont une action bénéfique, d'autres sont nocifs, et d'autres encore n'ont pas d'effets connus,* explique Christophe Mougel, chercheur à l'Institut de génétique, environnement et protection des plantes de l'Inrae de Rennes. *C'est tout cet ensemble que l'on appelle l'holobionte. Comprendre comment il fonctionne permettra de jouer sur les équilibres, de favoriser les organismes bénéfiques et de limiter ceux qui sont néfastes pour obtenir des plantes en meilleure santé.* » Au contraire de la lutte chimique qui ne fait aucune distinction entre la maladie ciblée et l'écosystème complexe dans lequel elle se développe, cette stratégie porte sur une connaissance fine d'une niche écologique où les espèces microbiennes luttent pour leur espace vital et modulent l'immunité de la plante.

Dans les scénarios élaborés par le programme prioritaire de recherche « Cultiver et protéger autrement » qui a publié ses conclusions en mars, la compréhension de l'holobionte est centrale. Constituées de cellules toutes semblables, les plantes arrivent malgré tout à générer des fonctions de protection de leur organisme, de communication avec leur environnement proche et lointain, notamment par l'émission de molécules chimiques, qui restent encore largement inexpliquées. Ainsi, tout l'enjeu d'une agriculture de demain respectueuse de la biodiversité consiste désormais à faire des plantes des collaboratrices plutôt que des asservies. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

▸ **Biocontrôle : éléments pour une protection agroécologique des cultures,** sous la direction de Xavier Fauvergue, Éditions Quae, 2020.

PROSPECTIVE

3 scénarios pour sortir des pesticides en 2050

1 L'HYPERTECHNICITÉ

Les exploitations ont une taille suffisamment importante et sont très spécialisées dans quelques cultures pour supporter des investissements massifs dans la robotisation, les drones, la télédétection, la modélisation prédictive. La santé de chaque plante est surveillée.

2 L'HOLOBIONTE

Cette stratégie porte sur une connaissance fine d'une niche écologique où les espèces microbiennes luttent pour leur espace vital et modulent l'immunité de la plante. La vie microbienne des sols, les microbiotes des feuilles sont utilisés pour optimiser la protection des végétaux.

3 L'AGROÉCOLOGIE

Les tailles des exploitations et des parcelles diminuent. Les plantations de haies et de bandes enherbées redonnent à la biodiversité 20 % de la surface. La lutte contre les ravageurs s'opère au niveau des paysages en évitant que de grands espaces soient consacrés aux mêmes variétés.

C. MOUGEL

« Comprendre comment l'holobionte fonctionne permettra de favoriser les organismes bénéfiques et limiter les néfastes »

Christophe Mougel, chercheur à l'Institut de génétique, environnement et protection des plantes de l'Inrae de Rennes

LIMICOL®

L'EFFICACITÉ PROUVÉE CONTRE LE CHOLESTÉROL

BÉNÉFICE SANTÉ VALIDÉ
par les autorités européennes

Le **premier et le seul** complément alimentaire pour **réduire le cholestérol** ayant obtenu une allégation de santé exclusive par l'Union Européenne.

PROUVÉ CLINIQUEMENT
-20%
DE LDL-CHOLESTÉROL DÈS 1 MOIS[1]

COMPLEXE BREVETÉ À BASE D'ACTIFS
D'ORIGINE NATURELLE
ET VITAMINES

Levure de riz rouge

Extrait d'ail

Extrait d'artichaut

Scannez pour en savoir plus sur Limicol et comment réduire votre cholestérol.

Vous avez des questions ?

Contactez notre service client au **05 46 56 30 48**

Consultez notre site : **laboratoire-lescuyer.com**

Ou rendez-vous sur nos **réseaux sociaux**

FORMULATION ET FABRICATION FRANÇAISES

LABORATOIRE LESCUYER
La micronutrition source de santé

Complément alimentaire. Ne se substitue pas à une alimentation variée, équilibrée et à un mode de vie sain. *La combinaison d'actifs de Limicol® réduit les concentrations de cholestérol LDL dans le sang. Une cholestérolémie LDL élevée constitue un facteur de risque dans le développement des maladies coronariennes. Il existe d'autres facteurs de risque qu'il est également important de surveiller. La modification de l'un de ces facteurs peut ou non avoir un effet bénéfique. Ce produit est destiné aux personnes devant contrôler leur taux de cholestérol sanguin. 1 - Réduction moyenne observée lors de 3 études cliniques réalisées sur un total de 184 sujets âgés de 18 à 65 ans, présentant une hypercholestérolémie non traitée : Ogier et al. Eur J Nutr 2013 ; Barrat et al. Int J Food Sci Nutr. 2013 ; Barrat et al. Eur J Nutr 2013

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE

De fascinants animaux indestructibles

Certains animaux ont développé des structures osseuses inédites, telle une musaraigne dont la colonne vertébrale lui confère une résistance incroyable à la pression. Mieux : un scarabée au squelette blindé peut supporter sans dégâts qu'une voiture lui roule dessus. Explications.

Petite mais extrêmement costaude ! Ne vous fiez pas à l'apparence frêle et délicate de cette musaraigne africaine d'une dizaine de centimètres de long. Sous la peau de *Scutisorex somereni* se dissimule l'une des architectures les plus résistantes qui soit. Marchez-lui dessus de tout votre poids durant quelques minutes. L'animal semblera ne rien ressentir, s'ébrouera pour repartir comme si de rien n'était, alors qu'il pèse entre 50 et 70 grammes, soit mille fois moins qu'un être humain adulte ! Son secret ? Une colonne vertébrale à nulle autre pareille, sur laquelle se sont penchés deux chercheurs du musée Field d'histoire naturelle de Chicago (États-Unis), Stephanie Smith et Kenneth Angielczyk. Ils publient leurs analyses dans la revue *Proceedings of the Royal Society B*. Grâce à la tomographie par rayons X, les scientifiques ont été en mesure de visualiser les vertèbres dentelées du dos de l'animal et de les comparer à d'autres musaraignes africaines.

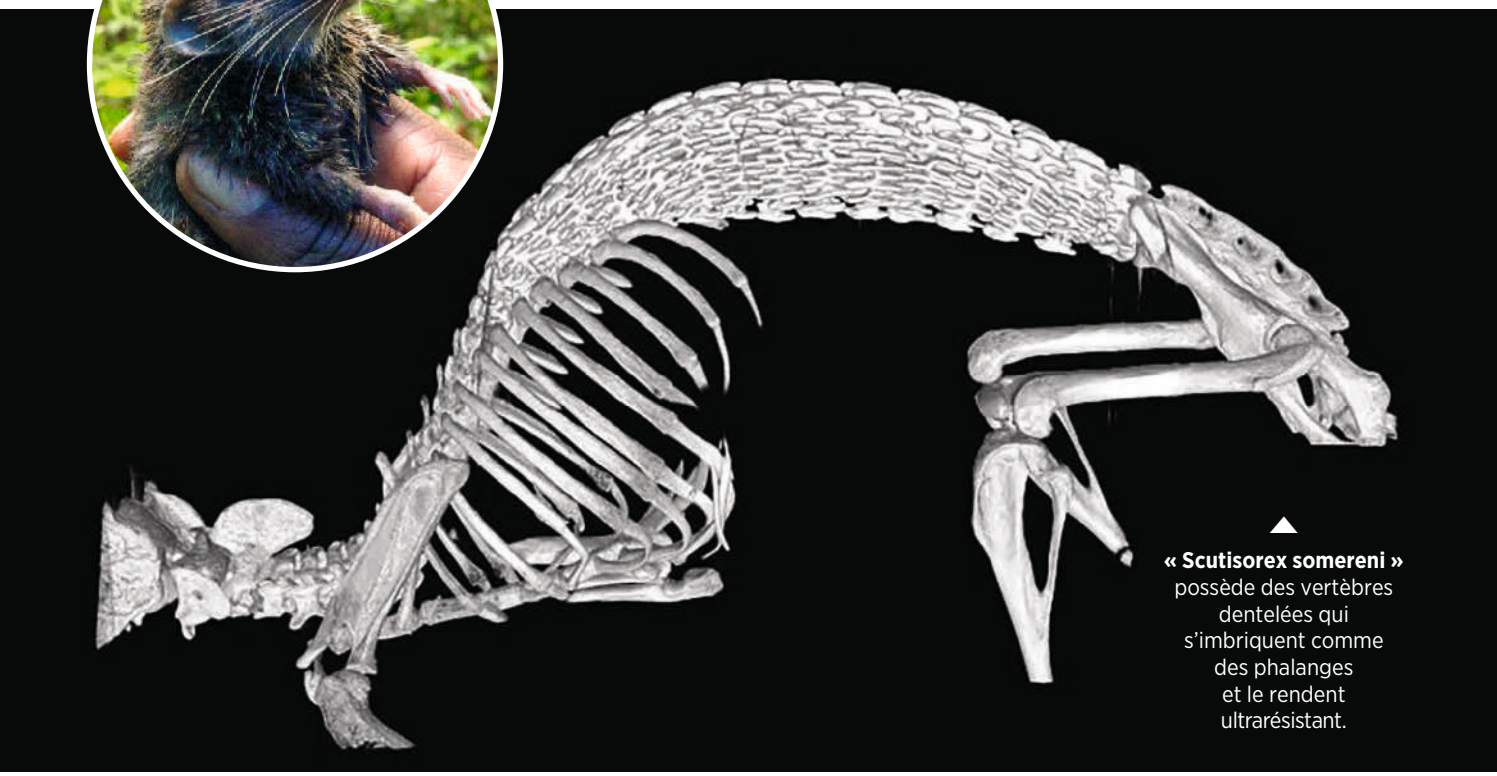
S'imbriquant comme des phalanges, les vertèbres des *S. somereni* ne ressemblent à rien de connu parmi les mammifères et lui confèrent cette résistance incroyable à la pression. En République démocratique du Congo, l'animal est devenu mythique parmi les Mangbetus, une population vivant au nord-est du pays, qui l'appellent la « musaraigne héros ». Au point d'en faire des talismans censés conférer invincibilité à ceux qui en consomment les organes, particulièrement le cœur, avant une chasse à l'éléphant ou une bataille contre une autre tribu.

Découverte en 1910 en Afrique équatoriale, *Scutisorex somereni* demeurera un siècle durant la seule espèce du genre *Scutisorex*. Il faudra attendre plus d'un siècle avant qu'en 2013, un travail publié dans *Biology Letters* par une équipe internationale de zoologues ne relate la découverte dans les mêmes forêts tropicales humides du Congo d'un proche parent, baptisé *Scutisorex thori*, en référence au puissant dieu Thor de la mythologie nordique. Mais il est plus petit que son cousin et possède une morphologie crânienne et un pelage légèrement différents. L'anatomie de son épine

JEAN-LOUIS HARTENBERGER

« Ce trait anatomique limite les mouvements de l'animal, le rendant moins rapide, moins souple et plus vulnérable »

Jean-Louis Hartenberger, ancien directeur de recherche au CNRS et auteur d'« Une brève histoire de mammifères » (Belin)



« Scutisorex somereni » possède des vertèbres dentelées qui s'imbriquent comme des phalanges et le rendent ultrarésistant.

JULIAN KERBIS PETERHANS, FIELD MUSEUM - THE FIELD MUSEUM

dorsale est également plus réduite : il n'a que huit vertèbres lombaires au lieu de 11, et elles semblent verrouillées moins efficacement. *« La comparaison des deux espèces montre que la colonne vertébrale de* somereni *est plus complexe. De plus, ses vertèbres sont davantage aplaties, comme s'il y avait une augmentation de cette tendance évolutive à une résistance accrue* », détaille Christiane Denys, professeure au Muséum national d'histoire naturelle de Paris, qui travaille sur l'évolution morphologique des petits mammifères africains.

Une proie indigeste pour ses contemporains

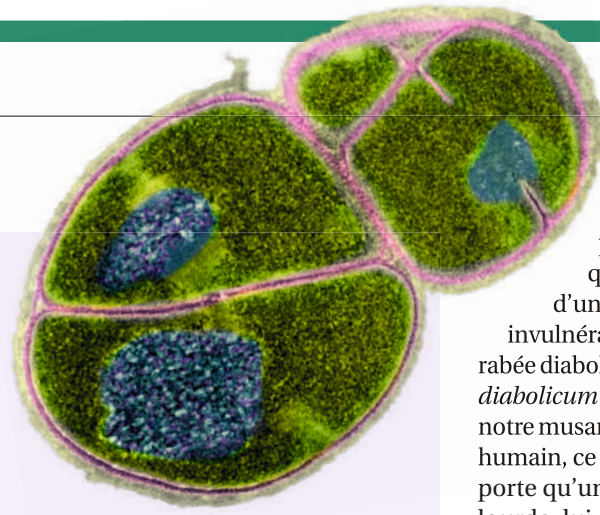
D'autres animaux sont connus pour posséder une colonne vertébrale renforcée, comme le tatou ou le fourmilier. En 2015, un article de *Nature* décrivait également un fossile du crétacé aux mêmes caractéristiques dorsales exhumé dans un gisement espagnol. Nommé *Spinolestes xenarthrosus*, ce petit animal d'une vingtaine de centimètres de long vivait voilà 125 millions d'années et appartenait au groupe primitif des triconodontes, aujourd'hui disparu. Mais si tous ces animaux possèdent également des vertèbres s'emboîtant les unes dans les autres, rien de comparable avec les *Scutisorex* qui ont poussé ce raffinement anatomique à l'extrême.

D'où une question légitime : si cette caractéristique confère à celui qui en est doté une superpuissance dorsale, pourquoi cette innovation ne s'est-elle pas répandue plus largement dans le règne animal ? *« Il faut croire que l'avantage évolutif n'est pas si important que cela,* suppose Jean-Louis Hartenberger, ancien directeur de recherche au CNRS et auteur d'*Une brève histoire de mammifères* (Belin). *Notamment parce que ce trait anatomique limite les mouvements de l'animal, le rendant moins rapide, moins souple et en définitive plus vulnérable.* »

En plus de sa colonne vertébrale renforcée, un animal comme le *Spinolestes* du crétacé devait posséder un pelage aux poils épaissis formant des épines tel le hérisson et une peau probablement recouverte d'écailles de kératine à l'image de ce que l'on retrouve aujourd'hui chez le tatou ou le pangolin. *« Autant d'éléments desquels on peut déduire que ce devait être une proie particulièrement indigeste pour tous ses contemporains, qu'ils fussent reptiles, oiseaux ou mammifères* », note Jean-Louis Hartenberger. Mais ce n'est pas le cas des deux espèces de *Scutisorex* actuels, qui ne possèdent aucune caractéristique externe les protégeant des prédateurs. La seule explication du caractère exceptionnel de leur colonne vertébrale se trouve probablement dans leur régime alimentaire, ont spéculé les auteurs de la découverte de *Scutisorex thori*. Dans les contenus stomacaux de leurs spécimens, ils ont découvert des insectes, des vers et des chenilles.

AUTORÉPARABLE

La bactérie qui résiste aux radiations nucléaires



Ses chromosomes en anneaux permettraient à « Deinococcus radiodurans » de réparer les brins d'ADN cassés par les radiations.

Parfois, les organismes les plus incroyables sont découverts de la plus banale des manières. C'est le cas de *Deinococcus radiodurans*, une bactérie non pathogène que l'on retrouve un peu partout sur la planète. En particulier dans… les boîtes de conserve. C'est ainsi qu'en 1956, l'Américain Arthur Anderson, après avoir stérilisé des conserves de *corned-beef* avec des rayons gamma, a été surpris de trouver dans l'une d'elles du bœuf avarié. En cherchant le responsable, il découvre alors que des colonies de *D. radiodurans* avaient survécu au rayonnement. Depuis, quantité de travaux ont été menés pour percer les secrets d'un organisme qui résiste à des niveaux d'irradiation plusieurs milliers de fois supérieurs à la dose mortelle pour un être humain. Le micro-organisme s'accommode si bien des radiations qu'on en a retrouvé sur les parois internes des réacteurs nucléaires ! *D. radiodurans* a vite été surnommée la bactérie Conan, en référence au héros sumérien créé par le romancier américain Robert Howard, vu ses capacités à résister également au froid extrême, à la sécheresse, au vide spatial ou aux solvants. En 2003, des chercheurs israéliens ont proposé une explication qui tiendrait à la structure en anneaux des chromosomes de la bactérie, lui permettant de réparer en quelques heures les brins d'ADN cassés sans qu'ils se dispersent dans la cellule.

M.J.DALY/USU

Après avoir interrogé les Mangbetus pour en savoir un peu plus sur les biotopes fréquentés par ces musaraignes, ils ont découvert que ceux-ci vivaient à proximité de bosquets de palmiers. Les chercheurs en ont déduit que ces insectivores pouvaient être capables de se glisser sous les écorces ligneuses des végétaux et de s'arc-bouter grâce à leur dos surpuissant pour soulever les écailles, accédant ainsi aux larves des invertébrés qui s'y réfugient pour échapper aux prédateurs.

La colonne vertébrale de cette musaraigne a beau être surpuissante, elle ne l'empêche donc pas d'en faire une proie vulnérable facile à croquer. Ce qui n'est pas le cas d'un autre animal, encore plus invulnérable, le bien nommé « scarabée diabolique cuirassé », *Nosoderma diabolicum* de son nom scientifique. Si notre musaraigne résiste au poids d'un humain, ce scarabée de 2 cm, lui, supporte qu'une voiture, 40 000 fois plus lourde, lui roule dessus ! Cette résistance étonnante a été étudiée et éprouvée sous toutes les coutures par une équipe américaine dans le magazine *Nature* à l'aide de scanners et de tests mécaniques.

LINDA TANNER

Le scarabée diabolique cuirassé, ou « N. Diabolicum », doit son nom à la véritable armure qui le rend invincible.

Une cuirasse que pourraient imiter les véhicules blindés

L'exosquelette de l'insecte n'a rien à envier à l'armure high-tech du superhéros Iron Man. Constituée d'un système de jointures sur plusieurs couches qui s'emboîtent comme un puzzle en trois dimensions, l'armature permet ainsi de redistribuer et de dissiper les forces exercées sur lui. Soumis à une forte pression, le blindage de l'insecte peut ainsi se fissurer par endroits mais sans jamais rompre totalement. Comme ses élytres sont soudés entre eux, ce scarabée est incapable de voler. Mais l'animal n'en a pas besoin : en cas de danger, il se contente de faire le mort et gare à l'imprudent qui s'aviserait de vouloir croquer l'insecte à l'allure de caillou. Il risquerait de s'y casser les dents. D'ailleurs, les chercheurs ont calculé que la résistance du blindage nécessiterait une force d'écrasement dix fois supérieure à ce que permet la plus puissante des mâchoires animales.

Ces animaux pourraient ne pas rester éternellement de simples curiosités de la nature : comme le prédit Po-Yu Chen du département en ingénierie de l'Université nationale Tsing Hua (Hsinchu, Chine) dans les pages de *Nature* : *« Les structures de* N. diabolicum *pourraient inspirer la conception de drones ou de véhicules blindés aux propriétés mécaniques bien supérieures aux matériaux actuels. »* ■

Hervé Ratel

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

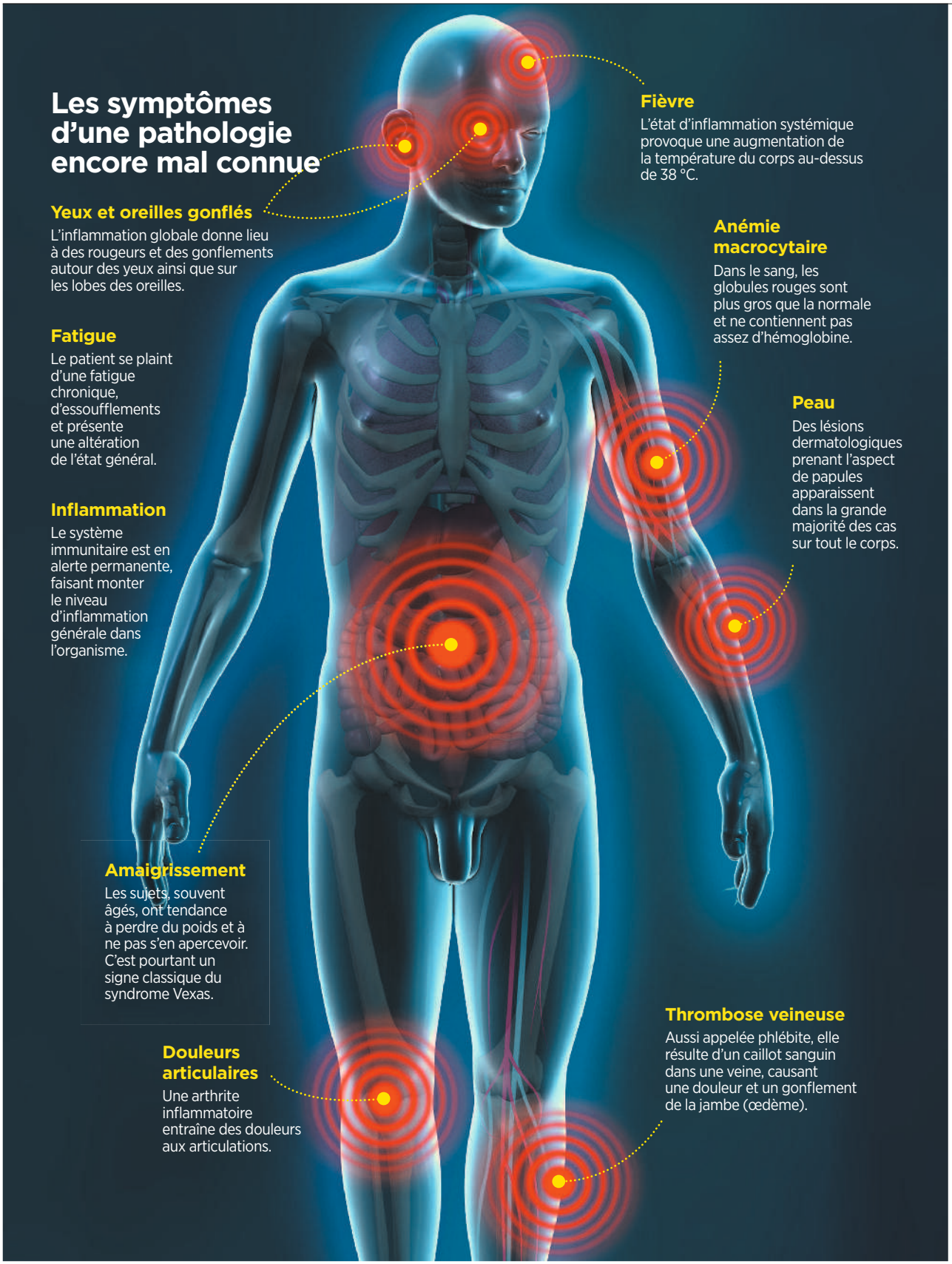
TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs chaque jeudi de 17H30 à 19H sur https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !	plus de 160 000 followers	plus de 163 000 instagrammeurs	Plus de 7 000 abonnés professionnels	plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2



BRUNO BOURGEOIS

Syndrome Vexas

Le défi d'une nouvelle maladie insaisissable

Identifiée en 2020, cette pathologie atteint en particulier les hommes de plus de 50 ans. Elle laisse, après la déclaration des premiers symptômes, une espérance de vie médiane d'environ dix ans. Pour le moment, la médecine avance à tâtons.

Par Coralie Lemke @CoralieLemke

Elle se souvient de ce jour d'octobre 2020 comme si c'était hier. Depuis plusieurs années, Sophie Georgin-Lavialle, professeure de médecine interne, voyait passer dans son service des patients aux profils atypiques. Souvent âgés de plus de 50 ans, fiévreux, avec des problèmes sanguins et des atteintes sur la peau. Pourtant, lors de leur consultation à l'hôpital Tenon à Paris, impossible de mettre le doigt sur la maladie dont ils souffrent. *Idem* pour ses confrères, qui rencontrent le même problème. Les médecins ont beau en discuter entre eux, impossible de résoudre le mystère de ces seniors dont la santé se dégrade. Jusqu'à ce qu'un soir, à l'automne 2020, une équipe américaine mette un nom sur le mal dont souffrent ces patients : le syndrome Vexas. « *Quel soulagement. Il s'agissait là d'une des plus grandes découvertes dans notre domaine. Dès le lendemain, nous avons passé en revue nos patients pour lister ceux qui pourraient correspondre. Dans le cadre du Plan national maladies rares, nous suivons nos patients atypiques de très près. Nous avons vite pu identifier ceux qui étaient potentiellement atteints et commencer à les tester sur le plan génétique dans les jours qui ont suivi* », se souvient Sophie Georgin-Lavialle.

Très vite, les réseaux s'activent. La filière de santé des maladies rares immuno-inflammatoires FAI²R s'organise en France et la plus grosse cohorte mon-

diale, composée de 310 patients à ce jour, se met sur pied en quelques mois. S'il a fallu autant de temps pour identifier ce syndrome, c'est parce qu'il se trouve au carrefour de plusieurs spécialités médicales : les maladies du sang, de la peau, les rhumatismes et les problèmes immunitaires. Surtout, il a eu la malchance de côtoyer une maladie bien plus en vogue en 2020, le Covid 19. « *Une personne sur deux atteintes de Vexas environ présente des lésions aux poumons. Or, avec l'apparition du Covid-19, on pensait que ces lésions provenaient du virus, car cela donne presque la même chose qu'un syndrome Vexas. On leur fournissait un traitement corticoïde.* Idem *pour les phlébologues qui retrouvaient des thromboses et des anémies* », se remémore Sophie Georgin-Lavialle. L'article publié dans le *New England Journal of Medicine* a enfin permis d'en dresser un portrait-robot. Cette maladie auto-inflammatoire déclenche une forte inflammation dans le sang chez les hommes âgés. S'ensuivent des épisodes de fièvre, des douleurs aux articulations semblables aux rhumatismes, des lésions cutanées en forme de papules, une perte de poids et une grande fatigue.

JAAD CASE REPORTS

Ces lésions cutanées, caractéristiques du Vexas, peuvent être confondues avec des plaques d'érythème ou d'œdème.

Certains patients présentent aussi une chondrite, une inflammation des cartilages aux oreilles et au nez.
Surtout, l'équipe de recherche de David Beck, généticien au centre médical NYU Langone Health de New York (États-Unis), a réussi à identifier la cause de la maladie : une mutation génétique. Il s'est pour cela penché sur le génome de 1 477 patients — adressés dans son centre pour cause de fièvre récurrente et d'inflammation systémique sans qu'aucune cause n'ait été trouvée. La même mutation sur le gène UBA1 a alors été retrouvée chez 25 hommes. Le syndrome Vexas venait d'être identifié. Mais depuis quand Vexas sévissait-il silencieusement chez les hommes de plus de 50 ans ? Impossible de le savoir. « *Le syndrome Vexas existe probablement depuis longtemps* », avance David Beck. Mais il ne s'est pas transmis d'une génération à l'autre par la génétique. « *Il s'agit de mutations*

SOPHIE GEORGIN-LAVIALLE

VERBATIM

SOPHIE GEORGIN-LAVIALLE

PROFESSEURE DE MÉDECINE INTERNE À L'HÔPITAL TENON À PARIS

« La fin d'une longue errance médicale »

" Avant l'identification de la maladie et du gène UBA1, il était impossible pour les malades de savoir de quoi ils souffraient. Le personnel médical les rangeait dans différentes catégories selon le symptôme principal identifié. Le patient présentait des problèmes sanguins ? On le considérait souvent comme ayant une maladie auto-immune et une myélodysplasie, avec trop peu de cellules sanguines matures saines et qui ne fonctionnent pas correctement. Ceux avec beaucoup de lésions sur la peau pouvaient être confondus avec un syndrome de Sweet, qui entraîne l'apparition de papules similaires. Enfin, ceux souffrant surtout d'articulations douloureuses ou d'inflammation aux yeux et aux oreilles se voyaient diagnostiquer une polychondrite atrophiante, maladie rare caractérisée par la survenue d'épisodes répétés d'inflammation de certaines structures cartilagineuses.
Certains ne se voyaient attribuer aucune pathologie en particulier. Si le patient était en mauvaise forme, présentait de l'inflammation avec un état général altéré mais sans polychondrite ni myélodysplasie, il était simplement considéré comme « *inflammatoire, fatigué et avec un amaigrissement* ».
Une description large, faute de plus de connaissances.
D'autres ont été étiquetés à tort comme ayant une vascularite, une inflammation des vaisseaux sanguins.
Les moins chanceux n'obtenaient malheureusement aucun diagnostic. " ■

Propos recueillis par C. L.

acquises. Elles apparaissent après la naissance, uniquement dans certaines cellules ou dans certains tissus, parfois dans le cadre normal du vieillissement. C'est totalement différent de mutations génétiques qu'on hérite de ses parents, qui sont présentes dans chacune des cellules du corps et qui peuvent être transmises aux générations futures », détaille-t-il. Les mutations UBA1 se trouvent sur le chromosome X, ce qui explique pourquoi ce sont essentiellement des hommes qui sont touchés. Si les mutations surviennent sur leur X, la maladie se déclare. Chez les femmes, la maladie se manifeste dans les cas rares de monosomie X, lorsqu'elles ne possèdent qu'un seul chromosome X.

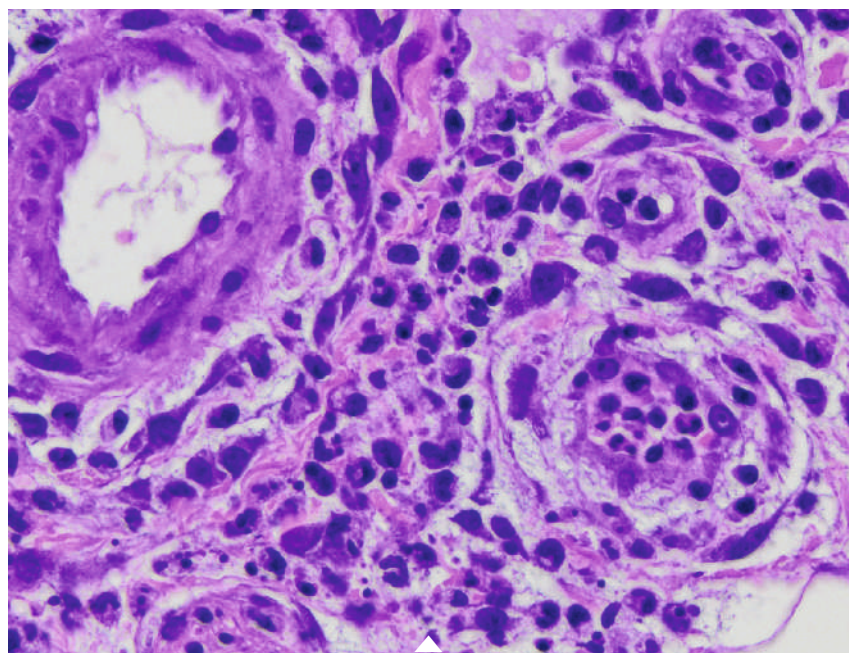
Un énorme travail pour faire connaître cette maladie

Après tant d'années à tâtonner, l'identification de la mutation sur UBA1 permet désormais de savoir s'il s'agit d'un Vexas ou non. Et de chiffrer l'incidence du syndrome à travers la population. Nouveau coup de tonnerre : sur les dossiers de 163 096 patients analysés par David Beck, 13 200 hommes et 2300 femmes de plus de 50 ans présentaient cette mutation. Avec une fréquence de un homme sur 4000 de plus de 50 ans, le syndrome Vexas est plus répandu que certaines maladies rhumatologiques telles que la polychondrite atrophiante ou le syndrome de Muckle-Wells. Chez les femmes, l'incidence est plus rare : une pour 26 000. Pour réaliser ces estimations, l'équipe américaine a travaillé sur une base de données de Pennsylvanie. La cohorte a beau être très circonscrite sur le plan géographique, ces chiffres sont transposables au reste du monde. Des milliers de patients atteints du syndrome Vexas s'ignorent donc. En France, la cohorte ne compte « que » 310 personnes, dont l'âge médian est de 73 ans. Le plus jeune a 46 ans. Et seules 5 % sont des femmes. *« Ce sont essentiellement des patients retraités qui ont, globalement, plus de 65 ans, qui ont tardé à s'occuper d'eux et dont les symptômes ont eu le temps de se développer »*, précise Sophie Georgin-Lavialle.

De là à déclarer que l'errance diagnostique est désormais terminée pour tous les patients à travers le monde ? Loin s'en faut. *« Il reste un énorme travail pour faire connaître cette maladie avant que les professionnels de santé aient le réflexe de rediriger leurs patients vers les services adaptés »*, rappelle le professeur Arsène Mekinian, spécialisé en médecine interne à l'hôpital Saint-Antoine à Paris. Tous les patients ont beau souffrir d'inflammation avec des poussées de fièvre récurrentes ainsi que d'anémie, difficile pour les médecins de penser tout de suite à un syndrome Vexas. *« Tous ne connaissent pas forcément cette maladie. Mais une grande fatigue, un amaigrissement, une altération de l'état général et l'apparition de lésions sur tout le corps risquent de mettre la puce à l'oreille d'un généraliste, qui enverra le patient en médecine interne,* explique Sophie Georgin-Lavialle. *Nous, de notre côté, nous savons depuis la publication d'octobre 2020 que le signe à ne pas rater est une anémie macrocytaire, présentant des globules rouges beaucoup plus gros que ce qu'on retrouve lors d'une anémie avec de l'inflammation.* » Chaque patient avec ce signe et de l'inflammation est désormais testé, même les femmes.

Comment déterminer les cas les plus sévères rapidement

Avec environ dix ans de survie médiane après le début des symptômes, le syndrome Vexas exige que des mesures soient prises rapidement. Mais devant cette maladie toute nouvelle, les médecins naviguent à vue. *« Nous faisons de la médecine à l'envers, afin d'essayer de savoir quels patients doivent être traités et comment. L'idée est de comprendre lesquels présentent la forme la plus sévère et lesquels ont une forme plus légère ne nécessitant pas de médicaments très forts »*, explique Arsène Mekinian. Avec ses collègues du French Vexas Study Group, il tente de classifier ses patients en sous-groupes afin de les traiter au cas par cas. *« Un*



©JAAD CASE REPORTS

La biopsie de la peau d'un bras de patient atteint de Vexas montre l'abondance de neutrophiles et de débris nucléaires dans le derme et la graisse sous-cutanée.

premier groupe avec une atteinte dermatologique, dont en général l'absence d'autres organes atteints peut permettre des traitements moins lourds. Un deuxième groupe avec une atteinte hématologique dont le pronostic est plus sévère. Et enfin, des personnes âgées montrant une forte inflammation et dont la situation se détériore rapidement », détaille le spécialiste.

À la recherche de biothérapies efficaces contre l'inflammation

Pour le moment, la greffe de cellules souches hématopoïétiques, issues d'un donneur, reste la seule option curative. Celles-ci sont fabriquées par la moelle osseuse et sont à l'origine des différentes cellules du sang : les globules rouges ou blancs et les plaquettes. Cette procédure par voie intraveineuse, également utilisée contre les leucémies, permet de reconstituer une moelle capable de générer des cellules sanguines fonctionnelles. Chez les patients les plus sévères, une greffe de moelle osseuse permet de corriger les anomalies dans le sang et d'améliorer ainsi un certain nombre de symptômes liés, comme l'essoufflement, la fatigue, l'anémie et la thrombose. Mais il faut pour cela que les patients soient encore assez en forme pour se soumettre à une procédure aussi lourde. *« Moins de 5 % des patients reçoivent une greffe à ce jour car ils sont dans un état trop sévère. Il y en a eu une dizaine par an en France depuis 2021* », commente Sophie Georgin-Lavialle.

En l'absence d'anomalie sévère dans le sang, les corticoïdes permettent d'agir sur la fièvre et la douleur. Avec l'inconvénient de créer une forme de dépendance chez le patient et de générer des effets indésirables. *« Le symptôme principal à contrecarrer étant l'inflammation, il existe plusieurs biothérapies qui constituent notamment une solution pour les sujets plus âgés* », précise la chercheuse. Parmi les pistes explorées figurent les anticorps monoclonaux anti-IL-6, déjà reconnus comme traitement de la polyarthrite rhumatoïde. En effet, l'interleukine IL-6, une protéine qui participe au contrôle de la réponse inflammatoire, est responsable du déclenchement de l'inflammation lorsqu'elle est produite en trop grande quantité dans le sang. Les anticorps monoclonaux sont des biothérapies qui permettent de contrer l'action inflammatoire de l'IL-6.

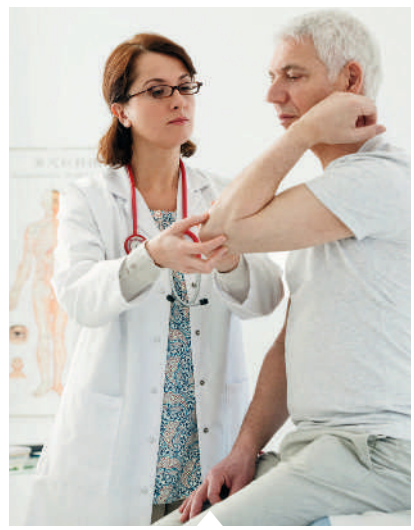
Une évolution de la maladie encore difficile à prédire

Autre traitement prometteur : les inhibiteurs des Janus Kinase, appelés « JAK inhibiteurs ». Les JAK sont des enzymes impliquées dans la signalisation de nombreuses cytokines pro-inflammatoires. Ce sont elles qui donnent le feu vert à la prolifération de cytokines, dont l'action déclenche une cascade inflammatoire dans l'organisme. Pour contrôler leur action, les thérapies (administrées par voie orale) qui ciblent les JAK ont pour but d'inhiber ces enzymes et donc de limiter les niveaux d'inflammation dans le corps. Mais l'évolution de la maladie reste difficile à prédire. Et sans traitement ciblé spécifique pour le moment, les malades gardent un pronostic délicat. L'urgence reste de déceler tous les cas qui s'ignorent encore. En espérant qu'au fil des années, la survie médiane des patients augmente progressivement. ■

ANOMALIES GÉNÉTIQUES

D'autres mutations soupçonnées

En parallèle d'UBA1, d'autres anomalies génétiques pourraient être en cause. Ce qui met la puce à l'oreille des médecins : des patients qui, sur le plan clinique, correspondent en tout point aux malades classiques du Vexas — inflammation, anémie macrocytaire, papules sur la peau, douleurs articulaires et altération de l'état général. Pourtant, la mutation sur le gène UBA1 n'est pas retrouvée dans leur ADN. *« Nous pensons qu'UBA1 est la cause génétique la plus commune pour expliquer Vexas, mais que d'autres gènes causant des manifestations similaires de la maladie vont finir par être identifiés »*, confie le généticien David Beck. Une découverte qui permettrait aux patients, toujours dans le flou, d'être diagnostiqués.



BSIP

En cas d'atteinte dermatologique épargnant les autres organes, le patient peut espérer un traitement moins lourd.

ARSÈNE MEKINIAN

« Nous faisons de la médecine à l'envers, afin d'essayer de savoir quels patients doivent être traités et comment »

Arsène Mekinian professeur spécialiste de médecine interne à l'hôpital Saint-Antoine à Paris

ELLE POURRAIT S'APPELER MONA

Un livre photo de DOMINIQUE PASQUET

Montrer des visages de la France d'aujourd'hui à travers des séries de portraits, voilà le but des photographies de Dominique Pasquet. Qui sont-ils ? Qui sommes-nous ? Il s'agit là d'une aventure littéraire et poétique.
Le photographe a en effet invité une trentaine d'écrivains, d'intellectuels et de journalistes à poser leur regard sur ses images

Format : 21,50 x 30 cm
104 pages
Façonnage : broché avec rabats
32 euros

En librairie le 26 mai
www.lelivredart.com
@pasquetdom

avec ALAIN GENESTAR, THIERRY GRILLET, DOMINIQUE BAQUÉ et MAX ARMANET, BERNADETTE ARNAUD, PIERRE ASSOULINE, ALEXIS BROCAS, RICHARD CANNAVO, DENIS DARZACQ, LÉA DOMENACH, NICOLAS DOMENACH, BERNARD GÉNIÈS, VALÉRIE HANNIN, AXEL KAHN, XAVIÈRE LAFFONT, OLIVIER LASCAR, DOMINIQUE LEGLU, YVES LE GRIX, MARIE-DOMINIQUE LELIÈVRE, GUILLAUME MALAURIE, CHRISTOPHE MAOUT, CATHERINE MALLAVAL, JOËLLE MIQUEL, ALAIN RIOU, ANNE VALÉRIAN, MAURICE SZAFRAN, ÉRIC TRÉGUIER

lelivredart

Une avancée majeure pour retarder le diabète

La récente mise au point d'un médicament capable de ralentir l'apparition du diabète de type 1 offre de nouveaux espoirs dans le traitement de cette maladie auto-immune. D'autres molécules sont également développées et d'intenses recherches sur la prévention sont menées à travers le monde.

C'est un espoir inédit : un nouveau médicament permet de retarder de trois ans en moyenne l'apparition du diabète de type 1 qui survient majoritairement chez l'enfant (60 % des cas). Trois années de moins, c'est loin d'être négligeable au vu des contraintes imposées par cette maladie (injections quotidiennes d'insuline, calculs précis des apports en sucres lors des repas, adaptation quotidienne en fonction des efforts physiques…). « *Il s'agit du premier médicament capable de modifier l'évolution naturelle de la maladie* », commentait Roberto Mallone, professeur d'immunologie clinique et diabétologue à l'hôpital Cochin, à Paris, lors de la séance plénière du congrès de la Société francophone du diabète qui s'est tenu à Montpellier fin mars.

Pour comprendre comment agit ce médicament, il faut d'abord rappeler ce qu'est le diabète de type 1. Il s'agit d'une affection complexe, dite auto-immune, au cours de laquelle certaines cellules immunitaires, les lymphocytes T, s'attaquent aux cellules bêta-pancréatiques productrices de l'insuline, l'hormone nécessaire à la régulation de la glycémie dans le sang. En principe, pendant l'enfance, les lymphocytes T « apprennent » à reconnaître les tissus du « soi » pour ne pas les attaquer. Mais chez les personnes qui vont développer un diabète

THÉRAPIE

La piste des cellules souches transformées

En mars, l'autorité sanitaire américaine (FDA) a donné son feu vert pour une thérapie inédite contre le diabète de type 1. Nom de code : VX264. L'idée est de transformer *in vitro* des cellules souches embryonnaires en cellules bêta-pancréatiques et de les implanter par voie veineuse chez des patients atteints d'un diabète de type 1 sévère. Cette thérapie cellulaire a été minutieusement mise au point par le Melton Lab à Harvard (Cambridge, États-Unis). Un premier test conduit chez un homme de 65 ans avec un protocole similaire a, selon des résultats présentés lors de congrès spécialisés mais non publiés, permis de se passer d'insuline depuis près d'un an et demi. Les essais doivent maintenant inclure 17 patients dans le monde. Pour la première fois, les cellules seront encapsulées dans un dispositif permettant de s'affranchir des traitements immunosuppresseurs.

CHASSENET / BSIP

Survenant majoritairement chez l'enfant, le diabète de type 1 impose des contraintes tout au long de la vie, notamment la surveillance quotidienne du taux de glycémie (ici avec un glucomètre) afin d'ajuster la dose d'insuline.

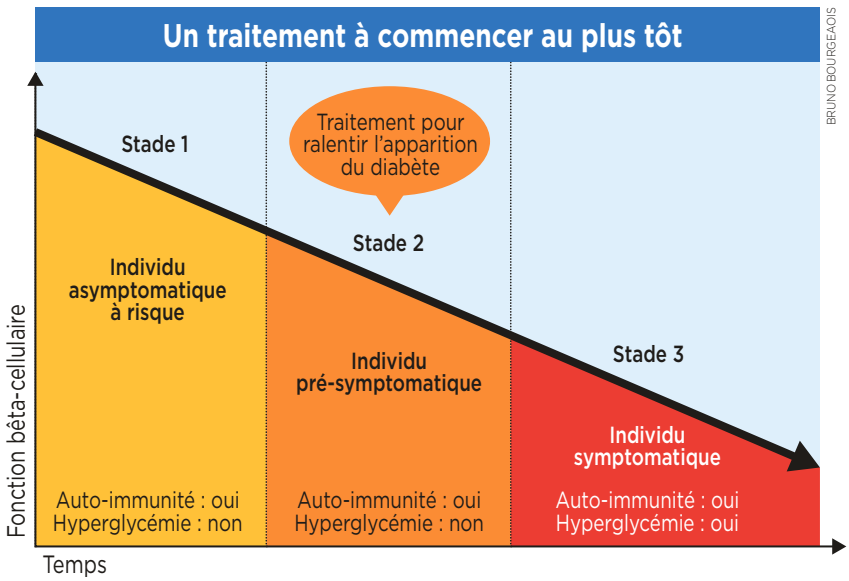
de type 1, cet apprentissage échoue pour certains lymphocytes T qui, en s'activant, s'attaquent au pancréas. Les chercheurs de la compagnie pharmaceutique Provention Bio (Sanofi) ont réussi à mettre au point une molécule, le téplizumab (Tzield), qui inactive les lymphocytes T, stoppant ainsi leur action destructrice. Comment ? En se liant à une protéine présente à la surface des lymphocytes, le CD3 ; d'où leur nom d'anti-CD3.

Cette approche a fait la première preuve de son efficacité en 2019 avec les résultats d'un essai pionnier international publiés dans le *New England Journal of Medicine*. Coordonné par le Dr Kevan Herold, président de TrialNet, un réseau clinique américain consacré au diabète de type 1, cet essai avait alors clairement démontré que l'anticorps anti-CD3, administré quotidiennement en intraveineuse durant quatorze jours, permettait de différer l'apparition de la maladie de trois ans en moyenne. L'étude avait été menée contre placebo dans deux groupes différents de personnes jeunes, sans antécédents familiaux ou avec des parents, frères ou sœurs diabétiques. Toujours en cours d'évaluation, la molécule est testée dans l'essai européen Protect auprès de 300 participants de 8 à 17 ans, chez qui le diagnostic de diabète de type 1 a été posé six semaines avant leur inclusion dans l'essai.

INSTITUT COCHIN

« Il s'agit du premier médicament capable de modifier l'évolution naturelle de la maladie »

Roberto Mallone, professeur d'immunologie clinique et diabétologue à l'hôpital Cochin, à Paris



S'il n'est pas possible de prédire la maladie au stade 1, des marqueurs sanguins permettent de déceler la dégradation de la fonction bêta-cellulaire au stade 2 et de retarder l'apparition de la pathologie. Au stade 3, un traitement insulo-dépendant est nécessaire.

Mais à quel moment faut-il administrer ce médicament, vu que l'on ne sait pas prédire le déclenchement de la maladie ? Ce dernier est en réalité progressif, s'étalant sur plusieurs années. Aujourd'hui, les spécialistes s'accordent à différencier trois stades pour le diabète de type 1 *(voir l'infographie ci-dessus)*. Des marqueurs sanguins (auto-anticorps) permettent de déceler l'atteinte pancréatique au stade 2. De nombreuses études ont démontré que près de 95 % des personnes détectées à ce stade développent une hyperglycémie dans les cinq ans. Le traitement avec l'anti-CD3 peut donc être commencé au plus tôt, dès le diagnostic posé. Aux États-Unis, l'agence du médicament (la Federal Drug Administration) a donné son feu vert l'hiver dernier pour administrer le teplizumab dès l'âge de 8 ans. La molécule n'est en revanche pas encore disponible en France. Mais l'attente est grande, *« ce résultat étant une véritable fracture dans l'histoire du diabète pédiatrique »*, comme le remarquait le Pr Jacques Beltrand (hôpital Necker-Enfants malades, Paris) pendant le congrès montpelliérain. D'autres molécules (abatacept, anti-TNF-alpha…) visant les lymphocytes font également l'objet d'essais.

Préserver la fonction des cellules bêta

Diverses stratégies, qui visent à préserver les fameuses cellules bêta se développent en parallèle. Par exemple avec le vérapamil, une substance utilisée depuis longtemps dans le traitement de l'hypertension artérielle. Des essais menés chez l'animal ont montré en 2018 que cette molécule pouvait inhiber la transcription d'un gène permettant la synthèse d'une protéine impliquée dans la destruction des cellules bêta, encore mal comprise. Comme le résumait déjà en 2016 Roberto Mallone, *« le diabète de type 1, c'est un peu le bon, la brute et le truand »*. Avec respectivement dans le rôle du « bon », le thymus, la glande qui produit les lymphocytes T (la « brute »). Quant au « truand », il serait interprété par la cellule bêta : *« Longtemps considérée comme une simple victime, elle n'est pas totalement innocente et participe activement à son autodestruction »*, détaille le spécialiste. D'où l'idée de diminuer leur mort programmée. Recourir au vérapamil pourrait ainsi préserver la fonction des cellules bêta.

Des essais sont menés tout particulièrement au sein du programme européen Innodia de dépistage chez les proches de personnes déjà atteintes par le diabète de type 1 *(voir l'encadré ci-contre)*. Et des combinaisons futures associant le téplizumab au vérapamil sont même déjà envisagées. Une autre approche dite de thérapie cellulaire, cette fois chez l'adulte, a été par ail-

RECHERCHE

Un programme européen de dépistage pour les proches de diabétiques

Lancé il y a six ans, le programme européen Innodia* (13 centres en France) permet aux proches de patients déjà connus comme atteints de diabète de type 1 de se faire dépister sur un mode totalement volontaire. Analyses régulières de sang pour les dosages d'auto-anticorps et aussi d'urine et de selles sont réalisées chez les apparentés au premier degré (frères, sœurs, parents ou enfants), le risque de diabète de type 1 étant pour eux 10 à 20 fois plus élevé que dans la population générale. À ce jour, près de 6000 Européens ont déjà participé, dont 618 en France. 44 d'entre eux ont été dépistés avec des auto-anticorps positifs et bénéficient d'une surveillance attentive.

* sciav.fr/916innodia

leurs récemment annoncée *(lire l'encadré p. 70)*.
Autant de perspectives de traitements qui posent la question du dépistage en population générale. La plus vaste tentative au monde à ce jour est l'étude FR1da. Démarrée en Allemagne en 2015, elle a porté sur près de 100 000 enfants d'âge scolaire. *« Son intérêt est d'avoir démontré que la recherche d'auto-anticorps, par le simple dépôt d'une goutte de sang sur un papier buvard, était possible dans ce cadre »*, précise Roberto Mallone. Résultat : près de 300 enfants dépistés, faisant depuis l'objet d'une surveillance biologique rapprochée et d'un recrutement dans des essais de prévention. À ce jour, une telle opération n'est pas prévue dans l'Hexagone.

La piste des facteurs environnementaux

Mais d'autres équipes ont décidé d'aller encore plus loin. L'objectif est d'aborder cette fois la prévention primaire, pour agir avant même l'apparition de tout phénomène d'auto-immunité. En clair, modifier les facteurs environnementaux dont le rôle dans la genèse du diabète de type 1 est suspecté depuis longtemps. Voilà en effet plus de cinquante ans que les scientifiques supposent qu'une infection virale par un agent de la famille des entérovirus (des virus à ARN) est impliquée dans le déclenchement de la maladie. Pour la première fois en 2011, une métanalyse publiée dans le *British Medical Journal* par des chercheurs de l'université de Nouvelle-Galles-du-Sud (Australie) a conclu à une association cliniquement significative. Récemment, à l'automne 2022, la même équipe australienne a réussi à confirmer ses travaux dans une étude présentée lors d'un congrès européen du diabète et publiée dans la revue *Diabetologia*. En utilisant des techniques virologiques moléculaires des échantillons (sang, selles, urine) de 12 000 volontaires diabétiques âgés de 0 à 87 ans, les chercheurs ont démontré que le risque d'infection à entérovirus était huit fois plus élevé chez les diabétiques que chez les volontaires sains. L'étude a aussi relevé que les diabétiques avaient 16 fois plus de risques que des sujets en bonne santé de contracter une infection à entérovirus dans les mois qui suivent le diagnostic du diabète.
D'autres travaux, menés cette fois en Finlande, ont précisément identifié certains membres de la famille des entérovirus, en l'occurrence les Coxsackievirus de type B. Une avancée qui ouvre de nouvelles perspectives tant vaccinales que thérapeutiques. Dans le premier cas, l'idée est de développer un vaccin anti-Coxsackievirus et de l'administrer chez les très jeunes enfants à risque, avant même que ceux-ci ne soient exposés à ces agents. De premiers essais commencés chez les rongeurs et les primates sont encourageants. Pour le second, il s'agira de mettre au point des antiviraux et là encore, de les proposer au plus tôt.
Si, aujourd'hui, les diabétiques ont accès à des dispositifs automatisés d'administration d'insuline (pancréas artificiel) pour remplacer les injections sous-cutanées *(lire* S. et A. *n° 892)*, les perspectives à long terme pour prévenir et traiter le diabète n'ont jamais été aussi enthousiasmantes. Avec l'espoir de réduire considérablement le chiffre de 2 millions de décès annuels causés par le diabète, tous types confondus. ■

Sylvie Riou-Milliot

500 millions
de diabétiques de type 1 et 2, en 2021.

8,7 millions
de diabétiques de type 1 dans le monde. Un chiffre qui pourrait doubler d'ici à 2040.

(SOURCE : THE LANCET, DIABETES & ENDOCRINOLOGY, 2022)

Les différences entre les deux types de diabète

	Type 1	Type 2
Âge de survenue	Dans l'enfance, dit aussi juvénile, maigre ou insulino-dépendant, avant 20 ans, pic de fréquence à 12 ans.	À la maturité, dit aussi gras, non insulino-dépendant.
Causes	Manque d'insuline en raison de la destruction auto-immune des cellules bêta.	Résistance à l'insuline.
Facteurs de risque	Génétique, environnemental.	Surpoids, sédentarité, etc.
Circonstances de découverte	Amaigrissement, soif, fatigue, polyurie, polyphagie.	Aucun signe particulier sauf si complications aiguës.
Complications	Elles sont communes aux deux types de diabète et sont de deux ordres : ▶ Aiguës : malaises hypoglycémiques et coma hyperglycémique (acidocétose). ▶ Chroniques : elles sont dues aux atteintes des vaisseaux, artères et veines, et des nerfs. De nombreux organes sont concernés : cœur, yeux, reins.	
Traitement	Insuline	Mesures hygiéno-diététiques, médicaments.

Le bio, encore de bonnes raisons de l'adopter

Consommer des aliments bio se révèle meilleur pour la santé que de consommer des aliments conventionnels, en raison notamment d'une moindre présence de pesticides de synthèse. Mais attention, certains sont à éviter, car ultratransformés.

Moindre exposition aux pesticides, souci du bien-être animal, impacts positifs sur l'environnement… Diverses raisons poussent à se tourner vers une alimentation issue de l'agriculture biologique. Mais depuis ces derniers mois, celle-ci pâtit de l'inflation : la part des Français ayant consommé des produits bio au moins une fois par mois l'an passé a baissé de 16 points par rapport à 2021 ; elle est désormais de 60 %. L'essor du bio dans la grande distribution a également désorienté le consommateur et fragilisé son image, 61 % de Français considérant qu'il s'agit avant tout de marketing (1). Pourtant, les études les plus récentes tendent à montrer que l'alimentation bio présente certains bénéfices de santé et nutritionnels, à condition de limiter les produits transformés.

Les fruits et légumes bio apporteraient plus d'antioxydants

Les végétaux bio fourniraient des teneurs légèrement plus élevées en vitamine C et en certains minéraux tels le fer et le magnésium (2). Fruits et légumes renfermeraient également plus d'antioxydants avec un bonus de 18 à 69 % de polyphénols, dont l'acide phénolique et les flavonoïdes. La consommation élevée d'aliments biologiques pourrait ainsi moduler les concentrations plasmatiques d'antioxydants dont les caroténoïdes (alpha-carotène, zéaxanthine, bêta-cryptoxanthine, lycopène, etc.). Des chercheurs français ont relevé, entre autres, des taux plasmatiques de bêtacarotène, précurseur de la vitamine A, de 1,09 µmol/l chez des individus du groupe alimentation bio contre 0,96 µmol/l pour le groupe alimentation conventionnelle (3).

85 %
des produits bio
sont exempts de pesticides quantifiables.
(SOURCE : EFSA 2021.)

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE

PESTICIDES Substances utilisées pour lutter contre des organismes considérés comme nuisibles. Ceux autorisés dans la culture bio doivent provenir de substances naturelles ou dérivées (huile de paraffine, cuivre, soufre, lécithine, etc.).

POLYPHÉNOLS Famille de molécules organiques capables de lutter contre l'oxydation et le vieillissement prématuré des cellules. Parmi eux, les flavonoïdes, les acides phénoliques, les lignanes, le resvératrol, etc.

HYDROPONIE Culture de plantes réalisée sur un substrat neutre et inerte (sable, billes d'argile, laine de roche, etc.), irrigué par une solution nutritive.

Le lait et la viande sont plus riches en oméga 3

Le lait de vache et la viande bovine issus de l'agriculture biologique contiendraient par rapport à leurs homologues conventionnels environ 50 % de plus d'acides gras polyinsaturés de type oméga 3, bénéfiques pour le système cardio-vasculaire et le cerveau, d'après des chercheurs anglais qui ont analysé 170 études consacrées au lait et 67 à la viande (4). En revanche, aucune différence significative n'a été trouvée entre les deux types d'alimentation concernant les taux d'acides gras saturés et mono-insaturés. À noter que l'utilisation d'OGM est interdite dans l'alimentation des animaux issus d'un élevage biologique et le recours aux antibiotiques limité au strict nécessaire.

Manger bio réduirait le risque de diabète…

C'est ce qu'ont observé des chercheurs franco-américains après avoir analysé les réponses de volontaires issus de la cohorte d'épidémiologie nutritionnelle NutriNet-Santé. Le risque de diabète de type 2 serait réduit de 35 % chez les plus forts consommateurs d'aliments bio (végétaux, viande, produits, etc.) comparé à ceux qui en mangent le moins. Parmi les hypothèses avancées pour expliquer cette différence : l'impact des pesticides (organophosphorés, pyréthrinoïdes…) sur divers mécanismes impliqués dans la dérégulation de l'équilibre du glucose et la résistance à l'insuline. D'autres études expérimentales et prospectives (suivant une population dans le temps) doivent néanmoins être menées pour confirmer ces résultats (5).

…et de surpoids

Consommer fréquemment des produits bio diminuerait de 23 % le risque d'être en surpoids et de 31 % celui d'être obèse, par rapport aux personnes qui n'en mangent jamais (6). Par ailleurs, une consommation régulière d'aliments bio réduirait de 34 % le risque de cancer du sein chez les femmes ménopausées et de 76 % celui de lymphomes non hodgkiniens, selon des données récoltées auprès de 69 000 volontaires issus de la cohorte NutriNet-Santé (7). Prudence toutefois : cette étude ne permet pas à elle seule de conclure avec certitude que manger bio prévient du risque de cancer. D'autres études épidémiologiques de grande ampleur sont nécessaires.

De nouvelles règles européennes

La réglementation européenne impose le même cahier des charges à tous les États membres. Cependant, depuis 2022, les règles se sont durcies pour les produits originaires des pays tiers. En l'absence d'accord commercial, tous les produits importés devront être conformes au règlement bio européen. L'Union européenne devra également procéder à des évaluations concernant l'usage de certains produits phytosanitaires autorisés par certains pays. En revanche, une plus grande souplesse a été accordée sur l'origine des produits. Ceux portant la mention « Agriculture UE » pourront contenir 5 % d'ingrédients non européens, au lieu de 2 % avant 2022. À noter que les cultures hors sol, dont l'hydroponie, restent interdites (8). ■

Sylvie Boistard @syboistard

ANNE-LAURE DENANS Nutritionniste et docteure en pharmacie à La Seyne-sur-Mer (Var)*

Peu d'additifs dans le bio

« Le bio n'utilise que 51 additifs parmi les 338 autorisés en Europe. Sept posent toutefois problème (contre 90 en alimentation générale) parmi lesquels le phosphore monocalcique, un phosphate et les carraghénanes (E407), un épaississant/gélifiant suspecté de favoriser les effets diabétogènes et inflammatoires au niveau de l'intestin. Attention à l'étiquetage, car certains produits bio restent des aliments ultratransformés qui peuvent contenir d'autres ingrédients délétères pour la santé comme du sirop de glucose-fructose ou de glucose, du fructose, qui augmentent le risque d'obésité et de maladies cardio-vasculaires. »

* Auteure du *Nouveau Guide des additifs,* Thierry Souccar éditions, 2017.

(1) Baromètre des produits biologiques en France, Agence bio, 2023.

(2) Are organic fruits and vegetables of higher quality and better for health? Amiot-Carlin M.J., *Cahiers de nutrition et de diététique,* 2023.

(3) Some Differences in Nutritional Biomarkers are Detected Between Consumers and Nonconsumers of Organic Foods, Baudry J. et al, *Curr. Dev. in Nut.*, 2019.

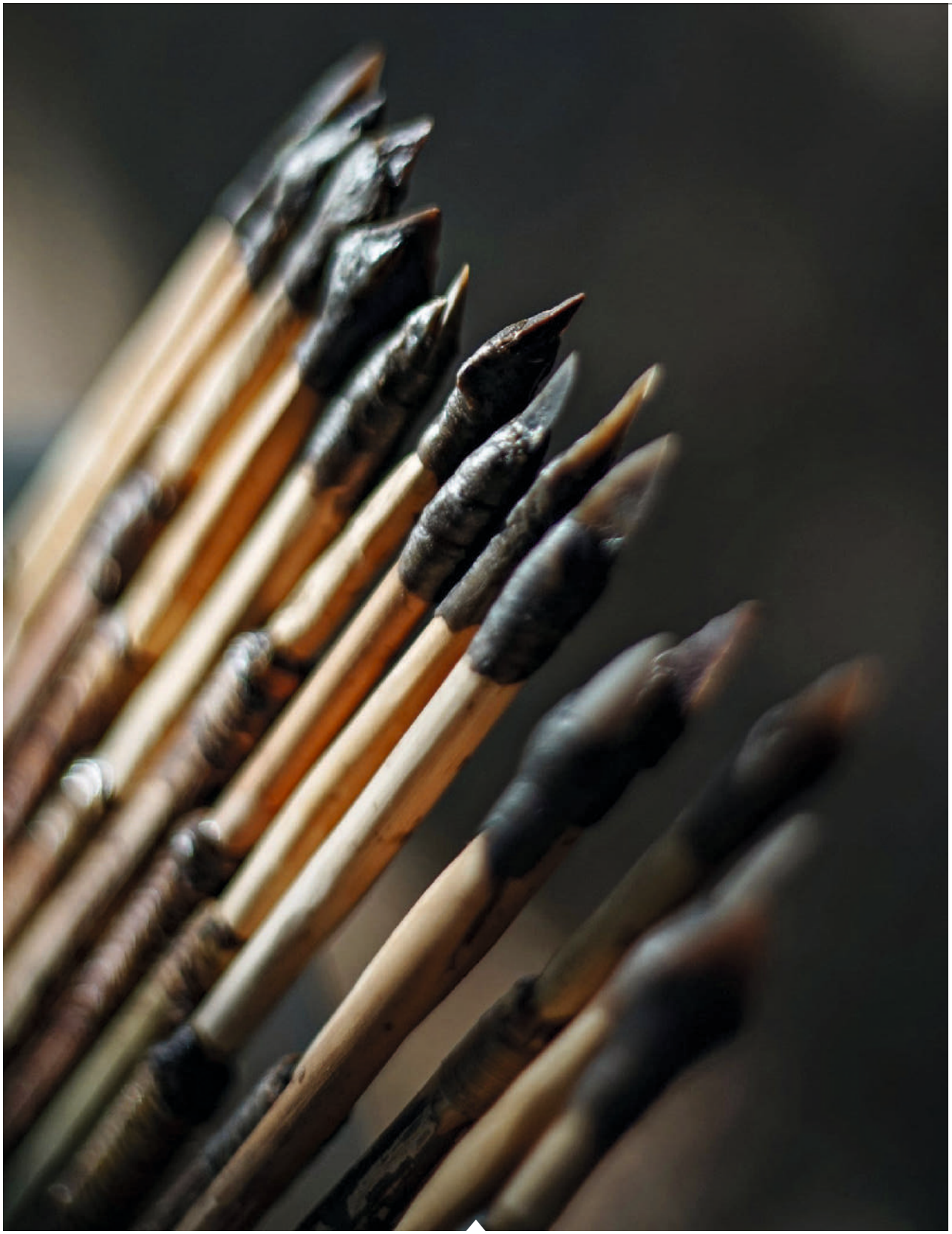
(4) Higher PUFA and omega-3 PUFA, (…) in organic milk, Srednicka-Tober D. et al, *BJN*, 2016.

(5) Prospective association between organic food consumption and the risk of type 2 diabetes, Kesse-Guyot E. et al, Int *J. Behav. Nutr. Phys. Act.,* 2020.

(6) Prospective association between consumption frequency of organic food and body weight change, risk of overweight or obesity, Kesse-Guyot E. et al, *BJN*, 2017.

(7) Association of Frequency of Organic Food Consumption With Cancer Risk, Baudry J. et al, *Jama Internal Medicine*, 2018.

(8) Règlement (UE) 2018/848 du Parlement européen relatif à la production et à l'étiquetage des produits biologiques, 2022.



LUDOVIC SLIMAK

Reconstitution des flèches vieilles de 54 000 ans, à partir des micropierres taillées mises au jour dans la grotte Mandrin (Drôme).

Les premiers archers

Révélations sur l'arrivée d'« Homo sapiens » en Europe

La découverte de pointes de flèche dans la grotte Mandrin de Malataverne (Drôme) fait reculer l'âge du tir à l'arc en Europe de plus de 40 000 ans. Elle confirme la venue d'« Homo sapiens » sur le continent européen 9000 ans plus tôt qu'on ne l'a longtemps pensé.

Par Rachel Mulot @Rachel_Fleaux

D'exquises et mortelles dentelles de pierre. Des centaines de petites pointes de flèche, exhumées dans la grotte Mandrin à Malataverne (Drôme), laissent penser que des *Homo sapiens* tiraient déjà à l'arc il y a 54 000 ans dans le sud de la France. L'invention de cette arme de jet majeure, qui permettait de transpercer toutes sortes de proies à distance, s'est faite sur le continent africain, comme l'atteste la découverte de pointes vieilles de 64 000 ans environ dans le KwaZulu-Natal, en Afrique du Sud. Celles-ci portaient encore des traces de sang de gibier et de la colle végétale servant à les fixer sur des tiges de bois ou de roseau. Dix mille ans plus tard, l'innovation technologique avait déjà fait son chemin jusqu'en Europe, montrent aujourd'hui des essais d'archéologie expérimentale doublés de multiples datations. Jusqu'alors, la plus ancienne preuve d'utilisation de cette arme de jet sur le continent européen était la présence d'arcs et de fûts de flèche en pin sylvestre datés d'il y a 10 000 à 12 000 ans, retrouvés dans les tourbières du Nord — un milieu parfait pour la conservation — à Stellmoor, en Allemagne. La nouvelle trouvaille de la Drôme fait donc reculer l'âge du tir à l'arc en Europe de plus de 40 000 ans ! Ce n'est pas la première fois que les fouilles de l'abri voûté Mandrin, entamées il y a trente-deux ans, font sensation. En 2022, une étude affirmait que les hommes modernes s'étaient aussi installés dans ce

refuge prisé par leurs cousins néandertaliens, et dont la stratigraphie retrace ainsi 78 000 ans d'occupation. Une dent de lait d'enfant *H. sapiens*, vieille de 54 000 ans, a en effet été exhumée dans le niveau appelé « couche E », qui vient s'intercaler entre de nombreuses couches d'occupation néandertalienne *(lire* S.et A. *n° 901)*. Selon son découvreur, Ludovic Slimak, chercheur CNRS à l'université Toulouse-Jean-Jaurès, cette unique quenotte moderne — étudiée sur le seul plan anatomique, sans analyse ADN — fait reculer la présence d'*Homo sapiens* sur le continent européen de 9000 ans avant leur occupation, plus à l'est, de la grotte de Bacho Kiro, en Bulgarie, il y a 45 000 ans. *« L'homme moderne est venu en Europe beaucoup plus tôt qu'on ne le pensait, bardé d'une technologie supérieure : l'arc et la flèche »*, souligne le chercheur. *H. sapiens* se serait donc installé au Mandrin pendant une quarantaine d'années. Tout juste un an après la dernière colonisation néandertalienne, et avant de disparaître de la région pendant quelque dix milliers d'années.

De minuscules outils très performants

La molaire moderne était associée à de nombreux outils, des petites pointes standardisées — dont certaines ne mesuraient que 1 cm de longueur — correspondant à une industrie peu fréquente : le néronien, que l'on trouve en Ardèche (grotte du Figuier, abri Moula, abri du Maras et grotte de Néron qui a donné son nom à la culture). Malheureusement, sur ces sites, on ne peut pas dire qui a fabriqué ces pièces néroniennes ni quand. *« Il s'agit de fouilles anciennes dont la fiabilité archéo-stratigraphique est incertaine »*, explique Ludovic Slimak. Pour cette nouvelle étude, c'est la tracéologie qui a été convoquée, discipline archéologique spécialisée dans l'analyse des traces d'usure, notamment sur les outils de pierre taillée. L'équipe de Laure Metz à l'université d'Aix-Marseille a ainsi publié dans *Science Advances* l'analyse fonctionnelle des artefacts en silex de la fameuse couche E, et notamment des pointes, *« plus nombreuses, plus fines et plus standardisées que celles retrouvées dans les couches supérieures et inférieures de la grotte Mandrin »*. Ces cailloux minuscules étaient leurs seuls indices. Car le bois, les fibres, le cuir, les résines et les tendons sont périssables et rarement conservés dans les sites paléolithiques européens. Les scientifiques ont ainsi multiplié les tests pour découvrir à quelles fins les pointes avaient été utilisées et comment certaines s'étaient abîmées *(lire l'encadré p. 80)*. Toutes les possibilités de projection ont été explorées et envisagées, assure-t-elle. *« En ce qui concerne les pointes les plus petites — les nanopointes — de largeur inférieure ou égale à 10 mm, nous ne pouvions les propulser qu'avec un arc car elles étaient trop petites et trop légères pour être efficaces autrement »*, souligne la chercheuse. Résultat ? *« L'arc est l'unique proposition plausible qui explique la formation des fractures d'impact observées, présentes chez un tiers environ des micro- et nanopointes du niveau néronien de la grotte Mandrin »*, explique Laure Metz.

Pas suffisant pour convaincre Jean-Jacques Hublin, directeur du département Évolution de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionniste de Leipzig (Allemagne) et professeur au Collège de France. Comment en effet s'assurer que ce sont bien des *Homo sapiens* qui ont taillé des pointes de flèche dans la grotte Mandrin ? *« Cette thèse ne repose que sur une dent de lait, un tout petit morceau qui a pu se balader dans la stratigraphie »*, estime celui qui a lui-même codécouvert une dent et des fragments d'os modernes en Bulgarie.

LUDOVIC SLIMAK

L'abri-sous-roche Mandrin (Drôme) a été occupé pendant près de 80 000 ans. Des « Homo sapiens » y ont fait une incursion il y a 54 000 ans, entre deux occupations néandertaliennes et ont taillé des micropointes de flèche (à droite).

« La culture des outils du moustérien [du nom du site du Moustier, en Dordogne], *attribuée aux néandertaliens en Europe — mais pratiquée par les* H. sapiens *en Israël et au Maroc —, était plus diversifiée qu'on ne le pense généralement,* explique-t-il par ailleurs. *Dans certaines variantes, on trouve des éclats fabriqués intentionnellement pas plus gros qu'un centime. Qui sait ce que les néandertaliens en ont fait ?* »

La grotte Mandrin, « Pompéi de la préhistoire »

Il a en tête l'asinipodien, une variante rare de l'industrie lithique du moustérien néandertalien, définie en 1975 par le préhistorien François Bordes (1919-1981) à partir du matériel découvert dans les grottes du Pech-de-l'Azé en Dordogne et datée de -74 000 ans à -70 000 ans. Au-delà des pièces à encoche et des denticulés — avec un tranchant denté comme une scie —, il comporte des petits éclats Levallois (moins de 2 cm de long) et des nucléus de moins de 3 cm de long. La preuve que Neandertal était capable de tailler intentionnellement de minuscules pièces. Mais dans ce cas, pourquoi aurait-il d'abord produit, par innovation ou par imitation, des petites flèches destinées au tir à l'arc, pour abandonner ensuite cette technologie ? Les néandertaliens qui ont occupé le site à la suite des *H. sapiens* n'ont pas dégainé de telles armes *(lire l'encadré ci-contre)*. À moins qu'il ne s'agisse d'un autre groupe de néandertaliens qui serait venu coloniser l'abri de la Drôme par la suite ? De fait, le site de Mandrin, que Ludovic Slimak qualifie de *« Pompéi de la préhistoire »* — car la partie actuellement fouillée ne représenterait qu'une infime portion du territoire occupé par nos ancêtres et cousins — est loin d'avoir révélé tous ses secrets. Ainsi, d'où venaient les hommes modernes qui ont occupé l'abri il y a 54 000 ans ? Le chercheur travaille depuis des années à retracer la route par laquelle ils sont apparus en France. Sur le chemin de la sortie d'Afrique, dans la grotte de Ksar Akil, près de Beyrouth au Liban, les pointes de pierre déterrées sont étonnamment similaires à celles retrouvées dans la Drôme et ont apparemment servi aux mêmes fins, argue-t-il. Il voit donc un lien entre les habitants du Levant et ceux de la vallée du Rhône. *« Les systèmes techniques du néronien à l'ouest de la Méditerranée sont semblables à ceux documentés au début de ce qu'on reconnaît sous l'appellation de paléolithique supérieur initial (PSI) dans l'Est méditerranéen. Il serait alors possible d'envisager l'existence de schémas*

TECHNOLOGIE

Pourquoi les néandertaliens n'ont-ils pas adopté cette arme ?

Les néandertaliens et les *Homo sapiens* qui fréquentaient la grotte Mandrin se sont-ils rencontrés ? *« À un moment donné, les deux populations ont coexisté soit dans la grotte, soit sur le même territoire »*, estime Ludovic Slimak, chercheur CNRS à l'université Toulouse-Jean-Jaurès. Quand *H. sapiens* arrive dans la région, on suppose un contact avec les néandertaliens, raconte Laure Metz, de l'université Aix-Marseille. Les hommes de Neandertal ont certainement vu cette technologie et été témoins de l'efficacité de cet armement novateur, mais les fouilles montrent qu'ils ne vont pas l'adopter, même après le départ des *H. sapiens*. Neandertal continue d'utiliser ses armes traditionnelles… (comme la javeline lancée à la main ou l'arme d'hast directement plantée dans l'animal). Pour l'équipe, *« les traditions et les technologies maîtrisées par ces deux populations étaient ainsi profondément distinctes »*, et le tir à l'arc a *« peut-être »* donné aux humains modernes un avantage concurrentiel sur les sociétés locales de Neandertal lors de leur expansion sur le continent mais sans qu'aucune preuve archéologique ne puisse étayer cette hypothèse. Marie Soressi, de l'université de Leyde, aux Pays-Bas, s'interroge : *« Je trouverais très étrange que les néandertaliens soient si conservateurs qu'ils ne copient pas les armes à propulsion mécanique utilisées par d'autres humains. »* D'autres sites montrent en effet que les hommes de Neandertal ont parfois développé, il y a environ 40 000 ans, des technologies dites du paléolithique supérieur, comme l'uluzzien ou le châtelperronien, considérées comme l'apanage des hommes modernes.

LAURE METZ

« L'homme moderne est venu en Europe beaucoup plus tôt qu'on ne le pensait, bardé d'une technologie supérieure : l'arc et la flèche »

Ludovic Slimak, chercheur CNRS à l'université Toulouse-Jean-Jaurès

MÉTHODE

Les détectives de l'archéologie expérimentale

Qu'est-ce qui distingue un vulgaire caillou d'un couteau ou d'une pointe de flèche ? Réponse : le travail des archéologues et des expérimentateurs. Laure Metz et son équipe de l'université Aix-Marseille ont reproduit les mêmes pièces de silex que celles retrouvées dans la grotte, afin de comprendre comment elles avaient été utilisées et, surtout, comment une grande partie d'entre elles se sont fracturées. Les chercheurs ont testé ces répliques pour voir si elles avaient été déformées naturellement (piétinement, fracturation à l'aide de rochers, etc.), dans la sphère domestique (pour couper, racler, dépecer) ou lors d'activités de chasse. Sur plus de 300 pièces taillées pour l'occasion, une centaine a été testée lors de tirs expérimentaux. Les pointes ont été emmanchées au bout de hampes de flèches tirées à l'arc, avec des sagaies lancées aux propulseurs ou à la main, et au bout d'épieux directement plantés dans des carcasses d'animaux. En comparant les pointes originales et leurs copies, l'archéologue a noté

LUDOVIC SLIMAK

La chercheuse Laure Metz teste des flèches munies de répliques de pointes préhistoriques.

que *« les fractures observées étaient clairement dues à des impacts correspondant à un choc à grande vitesse et ne sont apparues que sur les pointes utilisées lors de la chasse. »* Il s'agissait ensuite de découvrir comment ces éléments d'arme ont été propulsés. *« En ce qui concerne les armes les plus légères, celles lancées à la main étaient totalement inefficaces, vrillant pendant le vol. Celles projetées à l'aide d'un propulseur n'avaient pas la vitesse suffisante pour pénétrer et rebondissaient sur leur cible,* détaille Laure Metz, *alors que celles tirées avec un arc perforaient l'animal, le traversant parfois de part en part. »*

*historiques au sein desquels l'arrivée des premières sociétés d'*Homo sapiens *en Europe ne s'inscrirait pas au moment même de l'extinction néandertalienne, mais précéderait de 7000 à 10 000 ans cette extinction »*, écrivait-il dès 2017. La découverte de la molaire d'enfant moderne, publiée en 2022, est venue lui donner raison.

Mais il y a un hic : les restes d'*Homo sapiens* trouvés au Liban n'ont que 44 000 ans, soit 10 000 ans de moins que la dent moderne retrouvée dans la Drôme. *« En réalité, cela fait une décennie que l'on pense que ces dates ne sont pas bonnes,* explique Ludovic Slimak. *Et il est admis que les débuts du PSI, au Levant comme partout ailleurs, sont ici aussi bien antérieurs à 50 000 ans. Nous sommes là face aux limites du carbone et des méthodes de datation. Lors de ma thèse en 2004, le néronien était daté au carbone 14 et positionné vers… -40 000 ans. Voilà une chronologie qui est aussi acceptable que de dire que César est contemporain des premiers pas sur la Lune. »* Un article de fond sur toutes ces questions expliquant les connexions et contemporanéités entre Levant et Europe est en cours de relecture.

Ces précisions permettront-elles d'éclairer la présence si précoce d'*H. sapiens* dans le sud de la France ? Le mystère de la grotte Mandrin et de ses multiples occupants est encore loin d'être levé. Des études de l'ADN et du collagène contenus dans la couche E et d'autres sont en cours, qui permettront peut-être de lever le doute. Urine, protéines… Les os ne sont pas les seuls à laisser des traces parlantes pour la préhistoire. ■

Le retour
des intellectuels

A l'heure des fakenews et du wokisme, rien de plus important que d'écrire contre le sens du vent. En rassemblant dix-sept éditorialistes, venus de tous les univers – politique, économie, philosophie, histoire, science –, *Challenges* veut redonner vie à l'univers trop absent de la pensée. Dix-sept intellectuels libres, pas forcément d'accord, s'expriment régulièrement dans *Challenges* et sur challenges.fr dans le respect de notre charte prônant « *la défense d'une économie ouverte, humaniste et de progrès* ».

Philippe Aghion
Economie

Michel Winock
Histoire

Paul Krugman
Economie

André Comte-Sponville
Philosophie

Jean Tirole
Economie

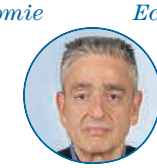
Patrick Artus
Economie

Luc Julia
Digital

Christian Gollier
Ecologie

Stefanie Stantcheva
Economie

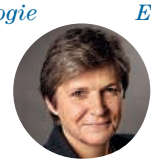
Nicolas Domenach
Politique



Marc Semo
International

Vincent Beaufils
Economie

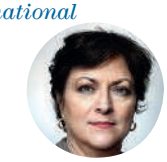
Anne-Marie Rocco
Economie



Ghislaine Ottenheimer
Politique

Maurice Szafran
Politique

Guillaume Malaurie
Société



Dominique Leglu
Sciences

Challenges

challenges.fr

Pour y accéder directement,
scannez le QR code

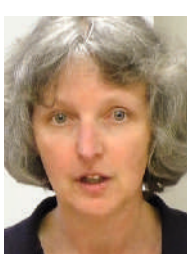
©M.Bertrand/Challenges-SP-Lagouite/ACI-F.Mantovani/Gallimard-B.Levy/Challenges -Harvard-B.Delessard/Challenges-B.Delessard/Challenges-C.Lebedinsky/Challenges-B.Martinez/SetA

Codex Sassoon, la vente du siècle

Cette copie la plus ancienne et la plus complète connue à ce jour de la Bible hébraïque a été estimée entre 30 et 50 millions de dollars. Datée entre 880 et 960, elle comporte les 24 livres sacrés du judaïsme. Une rareté qui en fait son prix.

À l'heure où vous lirez ces lignes, vous saurez si le record du prix de vente pour un livre a été battu. Le 17 mai, à New York (États-Unis), la maison Sotheby's aura mis aux enchères le codex Sassoon, du nom de son plus célèbre propriétaire, David Solomon Sassoon (1880-1942). L'estimation de l'objet était de 30 à 50 millions de dollars (de 27 millions à un peu plus de 45 millions d'euros environ). Un prix encore jamais atteint pour un manuscrit, tous types confondus. Le codex Sassoon est en effet un livre hors normes : c'est l'une des bibles hébraïques les plus anciennes et, surtout, les plus complètes qui subsistent au monde. Elle a été protégée consciencieusement par ses multiples gardiens et détenteurs depuis sa fabrication il y a plus d'un millénaire — entre 880 et 960 de notre ère, selon des estimations au radiocarbone communiquées par Sotheby's.

Depuis son acquisition par David Sassoon en 1929, le codex est toujours resté entre les mains de riches collectionneurs ou de fonds de pension. Son dernier propriétaire, le banquier d'affaires suisse Jacqui Safra, l'avait acheté en 1989 pour 3,19 millions de dollars, soit dix fois moins que sa nouvelle estimation. Le marché de l'art semble ne pas connaître la crise, mais à ce niveau, les clients potentiels sont rares. *« Peu d'institutions et seulement une petite poignée de collectionneurs aussi fortunés peuvent enchérir sur un tel prix,* affirme Yoel Finkelman, ancien conservateur des ouvrages judaïques à la Bibliothèque nationale d'Israël. *Mais il est arrivé par le passé que des musées s'associent pour acheter des manuscrits de grande valeur ou que des philanthropes fassent don de leurs achats à des bibliothèques ou à d'autres organismes.* »


JUDITH OLSZOWY-SCHLANGER

« Il n'a jamais été accessible à nous autres chercheurs. Nous n'avions qu'un microfilm noir et blanc de mauvaise qualité »

Judith Olszowy-Schlanger, spécialiste des documents juifs médiévaux à l'université d'Oxford, Royaume-Uni

Sa fabrication serait due aux scribes massorètes

Le codex Sassoon est bien connu des experts, même si ces derniers n'ont jamais réellement eu l'opportunité de l'étudier. *« Il n'a jamais été accessible à nous autres chercheurs. Depuis sa revente par la famille Sassoon en 1978, nous ne savions à vrai dire même pas entre quelles mains il se trouvait* », regrette Judith Olszowy-Schlanger, spécialiste de l'étude des documents juifs médiévaux à l'université d'Oxford (Royaume-Uni), qui a pu manipuler le codex quelques rares fois au cours de ces deux dernières années, avant que cette vente ne soit programmée. *« Comme support de recherche, nous n'avions qu'un microfilm noir et blanc de mauvaise qualité.* » À chaque vente de tels documents, les scientifiques espèrent que leur accès sera faci-

EFREN LANDAOS/SIPA

Seuls 12 feuillets manquent au codex Sassoon sur un total de 792. Rédigé en hébreu, il comporte notamment la cantillation, c'est-à-dire la prononciation de la hauteur musicale des voyelles de chaque mot.

lité, même si Judith Olszowy-Schlanger avoue craindre *« que le codex ne disparaisse à nouveau dans un coffre-fort »*.
Il y a pourtant fort à apprendre de l'ouvrage, celui-ci comptant parmi les trois seules bibles hébraïques de cette époque à être parvenues jusqu'à nous. Relativement bien conservées, car restaurées aux XII^e^ et XV^e^ siècles, ses pages comprennent encore les 24 livres de la Bible divisés en trois parties (le Pentateuque, les Prophètes et les Écrits, des textes que les chrétiens nomment l'Ancien Testament), avec la ponctuation et un ensemble important de notes critiques sur le texte, appelé Massorah. *« Autrement dit, il est quasi complet »*, assure Michaël Langlois, paléographe et spécialiste des manuscrits bibliques à l'université de Strasbourg. On attribue sa fabrication aux scribes massorètes, ces érudits juifs qui ont travaillé à la normalisation du texte de la Bible, qui n'a cessé de bouger durant l'Antiquité. *« À l'époque de la production des manuscrits de la mer Morte* [les plus importants manuscrits judaïques anciens encore existants], *entre le III^e^ siècle avant J.-C. et le II^er^ siècle après J.-C., les rouleaux de la Torah étaient copiés sans ponctuation, vocalisation ou accentuation*, détaille Michaël Langlois. *Aussi les juifs de l'Antiquité s'appuyaient-ils sur des traditions de lecture transmises oralement d'une génération à l'autre pour comprendre ces textes.* » Ce n'est que peu avant l'an mille que la Bible prend sa forme canonique, lorsque sont codifiées par les rabbins les traditions sur la manière d'épeler, de prononcer, de ponctuer et de chanter correctement les mots du livre le plus sacré du judaïsme. À partir de cette période, les manuscrits comportent alors de nombreuses annotations expliquant comment réciter les mots correctement.
Seulement voilà : entre les manuscrits de la mer Morte et la mise en place de ces canons bibliques subsiste un bien

ANALYSES

Un texte au défi de la datation

Le codex Sassoon ne possède malheureusement pas de colophon, du nom de ce petit ensemble d'informations placé dès la période médiévale à la toute fin du texte (l'équivalent de notre « Achevé d'imprimer » actuel). Il ne peut donc être relié à aucune date de fabrication précise. En 2017 toutefois, des analyses au carbone 14 réalisées par un laboratoire suisse sur plusieurs de ses pages suggéraient que le parchemin des folios avait été produit entre la fin du IX^e^ et le début du X^e^ siècle. En combinant ce résultat avec une étude paléographique, c'est-à-dire l'analyse fine de l'écriture du ou des scribes, Judith Olszowy-Schlanger de l'université d'Oxford (Royaume-Uni) est arrivée à l'hypothèse qu'il pourrait remonter aux alentours de 900 de notre ère, et qu'il serait donc plus ancien que le codex d'Alep lui-même.

MARCHÉ DE L'ART

Le grand business de l'archéologie biblique

L'archéologie biblique est l'un des secteurs les plus lucratifs du marché de l'art. Aussi, depuis les années 1990, de nombreux fragments de manuscrits de la mer Morte apparus sur le marché noir, parfois pas plus grands qu'une pièce de monnaie, ont joué plus d'un tour à des collectionneurs. Ce fut notamment le cas pour le fondateur du musée de la Bible à Washington (États-Unis), Steve Green, qui déboursa au début des années 2000 plusieurs millions de dollars pour l'acquisition de 16 fragments de manuscrits à la provenance douteuse. Il fut démontré par la suite par plusieurs chercheurs, analyse à l'appui, que tous étaient faux. « *C'est pourquoi nous nous méfions beaucoup dès que de nouveaux fragments, prétendument retrouvés à Qumrân, font leur apparition* », explique Michaël Langlois, qui connaît parfaitement les grottes du désert de Judée, sur la rive nord de la mer Morte, où ont été retrouvés entre 1947 et 1956 la grande majorité de ces manuscrits. Ils sont actuellement conservés dans le Sanctuaire du livre, une aile du musée d'Israël construite spécialement pour leur préservation. « *Bien sûr, des fragments peuvent toujours avoir échappé aux nombreux archéologues qui ont fouillé de fond en comble les cavités. Mais nous nous devons d'être extrêmement vigilants.* »

GIL COHEN MAGEN/XINHUA/SIPA

Des fragments d'un rouleau vieux de près de 2000 ans ont été découverts dans une grotte de la mer Morte en 2021.

étrange vide. « *Entre le IIe et le IXe siècle, il y a une quasi-absence de documents hébraïques qu'on n'explique pas,* affirme Michaël Langlois. *Bien sûr, nous avons quelques hypothèses pour justifier ce "trou", comme celle selon laquelle la plupart des textes auraient été brûlés ou cachés à cette période de persécution des Juifs. Mais toutes restent des explications spéculatives.* » À la fin du XIXe siècle, la découverte dans le grenier d'une synagogue du vieux Caire de plus de 400 000 fragments de textes sacrés et profanes, dont la plupart ne datent pas d'avant le IXe siècle pour les plus anciens, achève de convaincre les spécialistes que cet intervalle de temps est bel et bien une « *période silencieuse* » de l'histoire de la littérature juive. En effet, parmi l'immense corpus, nulle trace de Bible hébraïque ne fut trouvée. « *Et depuis, nous n'avons toujours rien* », regrette Michaël Langlois.

Il faut attendre le début du Xe siècle pour voir enfin apparaître un ouvrage biblique à part entière : le codex d'Alep, produit vers 910-930 de notre ère à Tibériade (Galilée) et conservé durant six siècles dans la ville d'Alep, en actuelle Syrie. « *À ce jour, il est considéré comme la plus ancienne Bible au monde,* affirme Michaël Langlois. *Mais le codex d'Alep est malheureusement très incomplet aujourd'hui, puisqu'environ un tiers de ses pages a disparu, dont une partie au cours des émeutes anti-juives survenues dans la ville syrienne en 1947.* »

C'est pourquoi les experts ont préféré le codex dit de Leningrad, conservé depuis de nombreuses années dans l'actuelle Saint-Pétersbourg (Russie), pour servir de base aux traductions modernes de la Bible. Complet à ce jour, le codex de Leningrad se paye même le luxe d'avoir un colophon, soit une note finale donnant un certain nombre d'informations, dont le nom de l'auteur et la date d'achèvement de l'écriture du manuscrit. « *Nous savons donc que le codex de Leningrad remonte à 1008 de notre ère, faisant de lui la plus ancienne copie du texte massorétique de la Bible hébraïque subsistant dans son entièreté.* »

Les traditions textuelles ne sont pas suivies avec précision

C'est donc entre le codex d'Alep et le codex de Leningrad que s'insère le codex Sassoon, qui a l'avantage d'être plus complet que celui d'Alep et, sans doute, plus ancien que celui de Leningrad, voire d'Alep *(lire l'encadré p. 83)*. Pourtant, les experts sont unanimes : tout érudit massorétique préfère amplement le codex d'Alep au codex Sassoon, malgré le côté lacunaire du premier. « *Le codex Sassoon ne suit pas avec précision les traditions textuelles connues, il est à vrai dire assez aléatoire,* nuance Michaël Langlois. *Mais il n'en reste pas moins un document rarissime et précieux.* »

Avant la vente, le document juif le plus cher jamais vendu était le Mahzor Luzzatto, un livre de prières du XIVe siècle adjugé en 2021 pour 8,3 millions de dollars. Quant au record du document historique le plus cher jamais vendu aux enchères publiques, il était détenu par un exemplaire de la Constitution américaine de 1787, vendu en 2021 pour 43 millions de dollars. Pour les chercheurs, l'espoir est désormais que le nouveau propriétaire du codex Sassoon soit plus enclin que ses prédécesseurs à ouvrir son accès à la recherche scientifique. ■

Marine Benoit @marin_eben

PROFITEZ D'UNE REMISE DE 20% SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET AVEC LE CODE PROMO : SA-VT23

VIVA TECHNOLOGY

LE PLUS GRAND ÉVÈNEMENT STARTUP ET TECH EN EUROPE

L'AVENIR DE LA SANTÉ SE LIT DANS LA DATA.

AVEC UNE PART DE MARCHÉ MULTIPLIÉE PAR 3 D'ICI 2030, DÉCOUVREZ COMMENT LA BIG DATA SE MET AU SERVICE DU MARCHÉ DE LA SANTÉ À VIVATECH.*

*SOURCE : STRAIGHTS RESEARCH - IN TECH WE TRUST = DE CEUX QUI CROIENT EN LA TECH

14-17 JUIN PARIS PORTE DE VERSAILLES

RÉSERVEZ VOTRE BILLET SUR VIVATECH.COM

IN TECH WE TRUST

CO-ORGANISATEURS

PUBLICIS GROUPE

Groupe Les Echos Le Parisien

africa news. euro news. Bloomberg Media CNN i24 NEWS The Washington Post webedia BFM BUSINESS

L'application de crème solaire doit être renouvelée toutes les deux heures et après chaque baignade pour qu'elle garde son efficacité.

GETTY IMAGES

Cinq questions pour protéger sa peau du soleil

Les méfaits du soleil pour la peau sont nombreux et se cumulent avec les années, bien souvent sans que l'on ne s'en aperçoive. Il faut s'en protéger tout au long de la vie.

Par Émilie Gillet, avec Agence Forum News

1 Soleil et peau, quels sont les risques ?

Dans la lumière du soleil, ce sont essentiellement les rayons UV qui sont néfastes pour notre peau. Invisibles à l'œil nu, il s'agit à 95 % d'UVA, capables de traverser nuages, vitres et derme. Ils sont responsables d'un bronzage rapide, mais de courte durée. Surtout, ils accélèrent le vieillissement cutané (relâchement des tissus, apparition de tâches pigmentées) et augmentent considérablement le risque de cancers de la peau (carcinomes et mélanomes). Quant aux 5 % d'UVB stoppés par les nuages ou une vitre, ils sont à l'origine d'un bronzage retardé mais de plus longue durée, en stimulant la production de mélanine par la peau. Pour autant, ils donnent aussi des coups de soleil, et dans une moindre mesure des cancers. En France métropolitaine, il est vivement déconseillé de s'exposer entre 12 h et 16 h l'été, plage horaire où les risques sont les plus importants. Le soleil est haut dans le ciel et l'angle d'incidence des rayons est le plus faible : pour une même surface, la quantité de rayons UV reçue est donc plus importante. Un bon repère pour s'en souvenir (valable en tout point de la Terre) est de regarder votre ombre : évitez de vous exposer au soleil lorsqu'elle est plus petite que vous ! Et n'oubliez pas que si c'est la durée cumulée d'exposition qui présente un danger, il est cependant utile de la fractionner, afin de permettre à la peau de « récupérer » entre deux expositions.

2 Comment bien choisir une crème solaire ?

Le meilleur moyen pour se protéger du soleil est de ne pas s'exposer ou alors de porter des vêtements couvrants et un chapeau à large bord. À défaut, il faut opter pour une bonne crème solaire, dont l'indice de protection doit être adapté. Les personnes avec une peau et des cheveux clairs, des taches de rousseur ou beaucoup de grains de beauté (on parle de phototypes I et II) et les enfants sont les plus à risque, notamment de coups de soleil. Celles qui ont une peau mate ou noire et des cheveux foncés (phototypes III à VI) ont moins de risques immédiats mais ne sont pas pour autant protégées contre le vieillissement cutané et les cancers provoqués par le soleil. Durant les premiers jours d'exposition, un indice FPS 50 est de rigueur

Un tiers des Français souffrent de maladies de la peau. Les femmes (33 %) sont plus concernées que les hommes (28 %)

80 000 nouveaux cas de cancers de la peau sont diagnostiqués chaque année en France. Dans plus de 80 % des cas, ils sont liés à des expositions excessives au soleil.

Challenges

ORGANISÉ PAR

Toulouse School of Economics

Les Echos Le Parisien ÉVÉNEMENTS

COMMON GOOD SUMMIT
1er et 2 juin
TOULOUSE

Sacrifices & Opportunités

Toulouse School of Economics et son conseil scientifique pour le Bien Commun

Photos : TSE - Mustafa Yalcin, Virginie Haffner / AFP

01 Climat

Comment être carbone neutre en 2050 ?
Lucile Schmid La Fabrique écologique

Pierre Coppey Vinci Autoroutes
Yann Leriche Getlink

02 Inégalités

L'inflation, facteur d'inégalités

François Villeroy de Galhau Banque de France

03 IA for Good

Joëlle Barral Google DeepMind
Eric Hazan McKinsey
Jean-François Bonnefon TSE

04 Mobilité

Quelle vision de long terme ?
Jean-Luc Moudenc Maire de Toulouse

▲ Carlos Tavares Stellantis
Christian Gollier TSE

05 Santé

Les médicaments et le bien commun
Rida Guiha Pfizer

Ariel Pakes Harvard
Jean Tirole TSE
Jean-Pierre Delord Oncopole Toulouse

06 Alimentation

Le bien-être animal, nouvelle préoccupation ?

Brigitte Gothière ▲ L214
Laurence Parisot Citi
Jean-Baptiste Voisin LVMH

Quelle alimentation pour demain ?

Thierry Blandinières Invivo

07 Relocalisation

La mondialisation contre les territoires ?
Frédéric Duval Amazon.fr

Marlène Dolveck SNCF Gares et connexions
Anabelle Viollet Banque des Territoires
Sylvain Rabuel DomusVi

INSCRIPTION **GRATUITE** SUR
CommonGoodSummit.com

PARTENAIRES OFFICIELS

amazon · Banque des Territoires · Domus Group · EDF · ExxonMobil · GETLINK · Google · invivo · LVMH · Pfizer · Pierre Fabre · Région Occitanie · SFA · SNCF Gares & Connexions · toulouse métropole · VINCI Autoroutes

PARTENAIRES MÉDIAS

La Recherche · Sciences Avenir

PARTENAIRES ASSOCIÉS

La Dépêche · Mouvement des Entreprises de France

BABETH DUPUY

AVIS D'EXPERTE

DR MARIE-ESTELLE ROUX DERMATOLOGUE À PARIS

« Rien ne permet de préparer la peau au soleil »

Les compléments alimentaires permettent-ils de préparer la peau au soleil ?
Rien ne prépare la peau au point de s'affranchir d'une protection solaire ! Les compléments alimentaires à base de bêta-carotène ou la vitamine C peuvent éventuellement participer à la réduction de la réaction inflammatoire cutanée et donc réduire le risque de coups de soleil, mais cela ne protège absolument pas contre le vieillissement cutané ou le risque de cancers. Par ailleurs on n'est jamais sûr de la qualité de ces produits. Si l'on veut des bêta-carotènes, mieux vaut privilégier une alimentation saine et variée, avec des carottes et du céleri branche par exemple !

Que penser des cabines à bronzage, qui se vantent, elles aussi, de préparer la peau au soleil ?
Elles sont à proscrire ! Zéro intérêt et 100 % de risque. C'est clairement une agression pour la peau avec une augmentation avérée du vieillissement cutané et du risque de cancers.

Prendre des médicaments expose-t-il à des risques particuliers au soleil ?
Oui, beaucoup de traitements très divers peuvent provoquer une photosensibilisation, c'est-à-dire augmenter le risque de coup de soleil ou de réaction allergique. C'est le cas de certains antibiotiques, de médicaments cardio-vasculaires, anticancéreux ou psychiatriques, ou encore de crèmes anti-inflammatoires. Il est impératif de se renseigner auprès de son médecin ou de son pharmacien et de bien se protéger même les jours où il n'y a pas un franc soleil. ■

Propos recueillis par É. G.

pour les peaux claires et les enfants, 30 à 50 pour les peaux les plus mates qui pourront passer à un indice FPS 30 par la suite. L'application de crème solaire doit être renouvelée toutes les deux heures et après chaque baignade. Concernant les crèmes solaires bio qui ne contiennent que des filtres minéraux (et non des filtres chimiques), elles ont l'avantage de ne pas présenter de risque allergique, mais leur application est rendue plus difficile en raison de leur texture blanche et collante. De ce fait, on a tendance à en mettre moins et donc à être moins bien protégé. Sachez enfin qu'il faut renouveler sa crème solaire chaque année : leur durée de conservation n'excède pas douze mois une fois le tube ouvert.

3 Faire disparaître les taches dues au soleil, est-ce possible ?

Sous l'effet combiné d'une exposition chronique au soleil, de l'âge et parfois des hormones, des taches hyperpigmentées peuvent apparaître (taches de vieillesse, masque de grossesse), principalement sur les mains, avant-bras et décolleté chez les personnes à peau claire. Il existe plusieurs techniques pour les faire disparaître, le laser ou la cryothérapie, qui doivent impérativement être mises en œuvre par un médecin dûment formé et en dehors de toute exposition au soleil. Quant aux produits cosmétiques et remèdes de grand-mère, ils sont au mieux quasi inefficaces, au pire dangereux pour la peau car photosensibilisants. La meilleure solution étant encore de se protéger du soleil systématiquement pour éviter que ces taches n'apparaissent.

4 Faut-il protéger les cicatrices du soleil ?

Une cicatrice profonde due à un traumatisme ou une intervention chirurgicale doit être protégée de toute exposition au soleil pendant un an. Car les processus de réparation cutanée sont lents et les UV peuvent prolonger inutilement le contexte inflammatoire et ralentir la cicatrisation, voire engendrer une cicatrice plus importante. Les personnes à la peau foncée (phototypes IV à VI) ont un risque plus important d'hyperpigmentation des cicatrices. Dans tous les cas, mieux vaut éviter d'exposer une cicatrice au soleil en la protégeant avec un vêtement ou un pansement. Ou à défaut avec de la crème solaire d'indice FPS 50+, en renouvelant l'application régulièrement. Après plusieurs années, certaines cicatrices plus claires que le reste de la peau doivent encore être protégées : comme elles ne produisent pas de mélanine, elles sont plus à risque de vieillissement cutané ou de cancer sous l'effet des UV.

5 Le soleil est-il toujours mauvais pour la peau ?

Non, certaines dermatoses sont d'ailleurs traitées par photothérapie. Dans le cas du psoriasis, les UVB ralentissent le renouvellement des cellules cutanées et permettent ainsi de réduire les lésions. Ils ont aussi un effet anti-inflammatoire intéressant dans certaines formes d'eczéma. Concernant le vitiligo, qui provoque une dépigmentation partielle de la peau, ces mêmes UVB stimulent les mélanocytes, ce qui va permettre, dans une certaine mesure, de repigmenter la peau. Mais comme ces rayons comportent toujours des risques, une photothérapie est toujours envisagée avec un médecin dermatologue et dans le cadre d'un protocole bien maîtrisé. Lorsque ces personnes s'exposent au soleil, elles doivent par ailleurs se protéger à l'instar de toutes les autres. ■

48H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEU

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

29 ET 30 SEPT. 2023

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN

& EN DIGITAL

Conférences & débats portés par les plus grands spécialistes, animations ludiques & immersives... nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

CHERBOURG en Cotentin

leCotentin COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

Partenaires Associés

CMN

LA MANCHE LE DÉPARTEMENT

NAVAL GROUP

RÉGION NORMANDIE

Organisé par

Les Echos Le Parisien ÉVÉNEMENTS

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

GETTY IMAGES

La solution à un problème résulte de la décantation d'un long travail de réflexion.

Les chemins de la découverte

Entre histoire des sciences et fonctionnement cérébral, le neurologue Yves Agid dresse dans un ouvrage teinté d'humour les différentes étapes de la découverte scientifique.

PROCESSUS Votre cerveau est au repos, mais des informations, des images, des rêveries, s'agitent librement, sans but apparent… Ne vous y trompez pas : cet organe stupéfiant est au travail, il s'active afin que la réponse à la question que vous vous posiez depuis des lustres émerge à vos yeux, simplement ! Ainsi parfois naît la découverte, dont le livre passionnant du neurologue Yves Agid décortique la genèse et les mécanismes, en traitant d'histoire des sciences et de fonctionnement cérébral, s'appuyant entre autres sur des exemples célèbres et de limpides croquis. Comment fait-on une découverte, quel chemin y conduit, quels en sont les déterminants ? On peut découvrir par hasard, comme ce fut le cas pour Alexandre Fleming avec la pénicilline, encore faut-il prêter attention à l'inattendu, s'étonner, douter, formuler des hypothèses audacieuses, puis avec persévérance en confirmer la validité.

Dans notre cerveau se joue un incessant processus de transition entre une phase d'activité subconsciente — prenant forme dans les aires corticales postérieures —, une période d'incubation, et enfin l'émergence à la conscience de la solution. Il ne s'agit pas toutefois d'un *eurêka !* mais de la décantation d'un long travail de réflexion accompli auparavant. L'auteur insiste sur le rôle irremplaçable de la créativité, de l'imagination, de la pluridisciplinarité, qui dans notre cerveau se traduisent en termes de neuroplasticité. Avec beaucoup d'humour, il distingue à la fin différents profils de découvreur : l'obsessionnel-compulsif agaçant, le chercheur « fou », inutile, *« sans oublier les nuls compétents, véritables constipés intellectuels… »* À découvrir. ■ **Andreina De Bei**

Le Cerveau, machine à inventer,
Yves Agid, Albin Michel, 208 p., 20,90 €

Les algorithmes de la créativité

PANORAMA En démarrant sur la manière dont l'intelligence artificielle (IA) AlphaGo a battu le champion du monde de go en 2016, cet essai masque un peu son sujet. Car plus que de performance, il est question de créativité. Physicien de formation, aujourd'hui concepteur de jeux vidéo, l'auteur évite les poncifs sur le sujet pour décortiquer le fonctionnement technique et les limites intrinsèques des algorithmes, en apprentissage comme en génération des contenus. **A. D.**

L'Art face à l'IA, Hugues Dufour, FYP Éditions, 204 p., 23,90 €

En quête d'une théorie ultime

DÉFI L'auteur raconte comment notre compréhension de la force de gravitation s'est forgée, en s'arrêtant particulièrement sur la relativité générale d'Einstein. Cette théorie fait de la gravitation une interaction à part, incompatible avec la physique quantique. Trois options s'ouvrent alors : *« Modifier la relativité générale sans toucher à la physique quantique, modifier la physique quantique sans toucher à la relativité générale, ou bien abandonner les deux théories pour en construire une nouvelle »*, détaille Marc Lachièze-Rey. **F. D.**

Gravitation, Marc Lachièze-Rey, Flammarion, 336 p., 24 €

De l'interprétation des tests génétiques

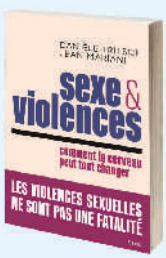
BD Les tests génétiques fleurissent un peu partout sur la toile avec la promesse d'élucider votre généalogie ou de révéler vos futures maladies. Mais pour « récréatifs » qu'ils soient, ces tests peuvent avoir des conséquences graves quand ils sont menés en dehors de tout cadre médical. Le généticien Philippe Amouyel revient de manière claire et didactique sur les enjeux de cette médecine prédictive. Il est aidé dans son propos par les compositions astucieuses de la dessinatrice. **H. R.**

La Génétique au cœur, Philippe Amouyel, Héloïse Chochois, Dargaud, 174 p, 22 €

Fausses nouvelles archéologiques

MYTHES N'en déplaise à un certain rappeur français, l'électricité n'a pas été inventée par les Égyptiens et les lignes de Nazca ne sont pas d'anciennes pistes d'atterrissage. Dans cette réédition actualisée d'un ouvrage de 2009, Jean-Loïc Le Quellec fait un tour exhaustif des « mythes scientifiques » modernes brandis par certaines livres, documentaires ou médias comme de véritables faits. On y apprend comment ces affirmations se sont construites et quels présupposés, politiques et raciaux, elles sous-tendent. **M. B.**

Des Martiens au Sahara, Jean-Loïc Le Quellec, Éd. Du Détour, 320 p., 25,40 €



Une approche cérébrale contre les abus sexuels

ACTES Cet essai captivant rappelle que le cerveau est le chef d'orchestre des relations sexuelles, qu'elles soient harmonieuses ou violentes. Les neurobiologistes Danièle Tritsch et Jean Mariani racontent les multiples phénomènes cérébraux à l'œuvre dans la tête dès qu'il s'agit de sexe. Tissant une approche scientifique, historique et sociologique, ils décrivent les ravages des abus sexuels sur les victimes et expliquent pourquoi certains individus, surtout des hommes, passent à l'acte. Pourquoi notre espèce aussi est la plus violente envers les femmes et les enfants. Balayant la distinction inné-acquis, les scientifiques rappellent la formidable plasticité du cerveau, qui permet à chacun d'intégrer l'influence des facteurs génétiques et socioculturels de son environnement. Cet éclairage biologique original élargit considérablement les possibilités de prévenir les violences et de guérir victimes et bourreaux, estiment ces optimistes. Parfaitement documenté, bien mené, ce livre devrait être remboursé par la Sécurité sociale ! ■ **Rachel Mulot**

Sexe et violences, comment le cerveau peut tout changer, Danièle Tritsch et Jean Mariani, Seuil, 378 p., 21 €

Danse avec les photons

EXPÉRIMENTATION De toutes les propriétés de la physique quantique, l'intrication est la plus étrange : des particules intriquées peuvent influer les unes sur les autres instantanément, quelle que soit la distance qui les sépare. Le physicien autrichien Anton Zeilinger, prix Nobel en 2022, a passé sa carrière à démontrer la réalité de l'intrication. Au travers d'une fiction mettant en scène deux étudiants, Alice et Bob, il propose aux lecteurs une découverte par une série d'expériences de ce phénomène. Une passionnante plongée dans l'esprit d'un expérimentateur de génie. **F. N.**

Le Bal des photons, Anton Zeilinger, Flammarion, 384 p., 25 €

Un être si singulier

CÉTOLOGIE Loin de l'imagerie véhiculée par le cinéma, cet ouvrage nous fait découvrir comment les dauphins, descendants d'un mammifère ressemblant à un chien, se sont adaptés à la vie marine en développant des sens, telles l'écholocalisation ou l'électroréception, la maîtrise de la respiration… Mais ils nous sont aussi très familiers, se désignant par une signature acoustique, nouant des alliances, etc. Cétologue, Fabienne Delfour fait ici un état des lieux de ce que la science a appris de ces êtres singuliers. **S. R.**

Dans la peau d'un dauphin, Fabienne Delfour, Flammarion, 320 p., 22,90 €

EXPOSITIONS

Amboise (37)

Léonard de Vinci et l'anatomie, la mécanique de la vie
Livres d'époque, maquettes, dessins, instruments de dissection aident à comprendre comment l'artiste-inventeur s'était constitué un savoir d'anatomiste. Ces travaux préparaient un traité d'anatomie qu'il n'a jamais publié.
Château du Clos Lucé, 2, rue du Clos Lucé, du 9 juin au 17 septembre. Rens. : 02.47.57.00.73.

Bordeaux (33)

L'art préhistorique, de l'Atlantique à la Méditerranée
La question d'un « art » de la préhistoire fait l'objet d'un vaste débat. Les objets présentés ici (parures, gravures, instruments de musique), remontant jusqu'à 40 000 ans dans le passé, servent d'éléments de réponse.
Musée d'Aquitaine, 20, cours Pasteur, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens. : 05.56.01.51.00.

Tous à plumes !
Plumages, empreintes, chants, couleurs, techniques de vols… Ce parcours consacré aux oiseaux joue la carte du sensoriel et de l'immersion.
Muséum, 5 place Bardineau, jusqu'au 5 novembre. Rens. : 05.24.57.65.30.

Le Havre (76)

Esclavage, mémoires normandes
Sur trois sites (Le Havre, Honfleur et Rouen) est détaillée l'implication de la Normandie dans la traite atlantique entre 1750 et 1848. Documents d'archives et objets font état de la connaissance scientifique sur le sujet.
Hôtel Dubocage de Bléville, 1, rue Jérôme-Bellarmato, jusqu'au 10 novembre. Rens. : 02.35.42.27.90.

Paris (75)

Médecines d'Asie, l'art de l'équilibre
C'est la première exposition en France consacrée aux trois grandes médecines orientales, d'Inde, du Tibet et de Chine. Quatre espaces explorent les mythes, le diagnostic, la « médecine de l'âme » et le dialogue Orient-Occident.
Musée national des arts asiatiques Guimet, 6, place d'Iéna, jusqu'au 18 septembre. Rens. : 01.58.52.53.00.

Rocquencourt (78)

Insectes, au service des écosystèmes
Sur 1,6 km en extérieur, des maquettes 2D, des boîtes entomologiques, des photos macroscopiques détaillent le rôle essentiel des insectes pollinisateurs. Abeilles, mais aussi mouches, papillons, coléoptères.
Arboretum de Versailles-Chèvreloup, 30, route de Versailles, jusqu'au 5 novembre. Rens. : 01.39.55.53.80.

Toulouse (31)

Vie sauvage au cimetière Terre-Cabade
Derniers jours pour voir cette série de photographies nocturnes de Guillaume Rivière, réalisées avec le botaniste Boris Presseq. Elles dévoilent la biodiversité d'un cimetière toulousain.
Muséum, 335, allées Jules-Guesde, jusqu'au 25 juin. Rens. : 05.67.73.84.84.

Valence (26)

L'Univers sans l'Homme
Titrée d'après une formule de Charles Baudelaire, cette exposition montre comment des artistes, du XVIIIe siècle à nos jours, éliminent la représentation de l'humain. Paysages, villes dépeuplées ou détruites, robots, obligent notre espèce à se décentrer.
Musée d'Art et d'archéologie, 4, place des Ormeaux, jusqu'au 17 septembre. Rens. : 04.75.79.20.80.

Verdun (55)

Destins de Verdun
Né de publications sur les réseaux sociaux, ce parcours retrace 20 destins individuels que la bataille de Verdun a bouleversés. Textes, photos et sons font le lien entre les histoires humaines et le terrain.
Mémorial de Verdun, 1, avenue du Corps-européen, jusqu'au 28 avril 2024. Rens. : 03.29.88.19.16.

ROMARIC TOUSSAINT - RNDP

Un vitrail provenant de la sacristie de la cathédrale illustre le travail de restauration des maîtres verriers.

Paris (75) / Exposition

Notre-Dame de Paris : au cœur du chantier

Ils sont grutiers, charpentiers, échafaudeurs, cordistes, maçons et tous participent à la restauration de Notre-Dame. Certains étaient là dès le lendemain de l'incendie qui a en partie détruit la cathédrale mi-avril 2019, pour consolider l'édifice ou déposer les vitraux. C'est à tous les métiers impliqués dans ce chantier que se consacre cette petite exposition, dans l'espace autrefois occupé par le parking souterrain sous le parvis. Des vestiges carbonisés de la charpente ou un pan de toit en plomb fondu issu de la flèche sont visibles, mais l'essentiel détaille le rôle des maîtres verriers, tailleurs de pierres, experts forestiers facteurs d'orgue…, qui côtoient pléthore de scientifiques. Car, même si cette coexistence n'a pas toujours été facile, le chantier de restauration se double d'un chantier scientifique. C'est d'ailleurs par lui que s'ouvre l'exposition, mettant à l'honneur archéologues, acousticiens ou historiens ainsi que les découvertes qu'ils ont faites grâce — paradoxalement — à l'incendie. ■ **A. D.**
Espace Notre-Dame, parvis de Notre-Dame de Paris, jusqu'à décembre 2024. Entrée libre. Rens. : sciav.fr/916notredame

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

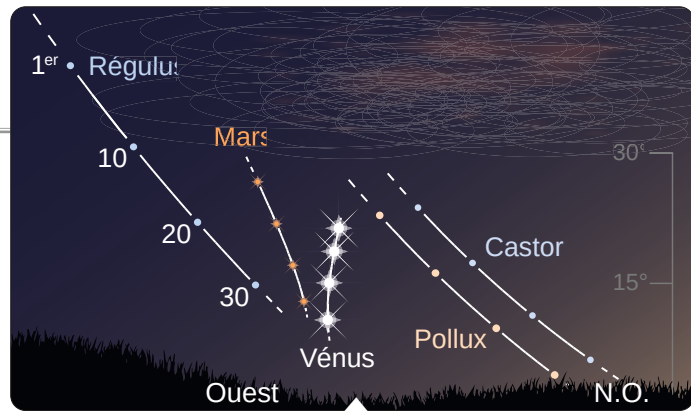
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète n'est pas observable ce mois, perdue dans les lueurs du levant.

VÉNUS L'étoile du Berger atteint sa plus grande distance angulaire (45°) à l'est du Soleil le 4. Étincelante, elle attire irrésistiblement le regard en soirée vers l'ouest. Toutefois, l'abaissement progressif de l'écliptique sur l'horizon entraîne une diminution de sa hauteur et un coucher de plus en plus précoce. Ainsi, Vénus passe sous l'horizon 3 h 20 après le Soleil le 1er et 2 h 10 après lui en fin de mois.

MARS La planète Rouge est visible en soirée, non loin de Vénus. Son éclat est à peine supérieur à celui de l'Étoile polaire. Mars quitte la constellation du Cancer le 20 et entre alors dans le Lion.

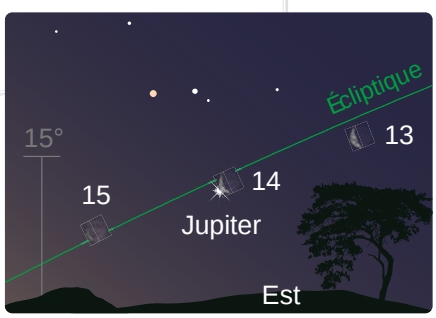


La scène est représentée 1 heure après le coucher du Soleil. Les planètes Vénus et Mars et les étoiles Régulus, Castor et Pollux se rapprochent de l'horizon au cours du mois.

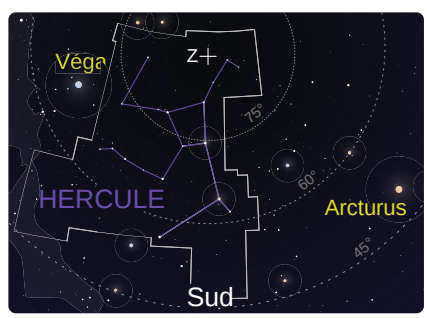
L'au revoir à Vénus et Mars

C'EST LE MOMENT OU JAMAIS DE REPÉRER MARS ET VÉNUS EN SOIRÉE! En effet, les deux planètes glissent dans la direction du Soleil jour après jour, sont de plus en plus basses et finiront par disparaître dans le crépuscule d'ici à quelques semaines. Elles sont accompagnées dans cette descente vers le couchant par les étoiles de première grandeur Castor et Pollux des Gémeaux et Régulus du Lion.

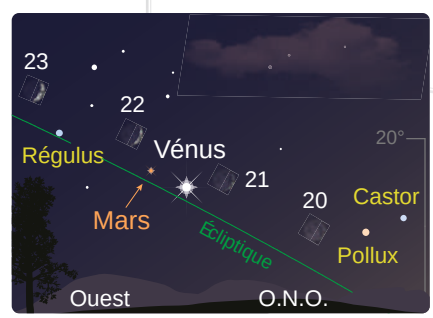
Notre conseil Assurez-vous d'avoir un horizon ouest bien dégagé. Commencez par repérer Vénus et à partir de là, essayez de localiser les autres astres.



LE 14, 1 HEURE AVANT LE LEVER DU SOLEIL et à une bonne dizaine de degrés au-dessus de l'horizon, le limbe du dernier croissant de Lune est à moins de 1° de Jupiter.



HERCULE EST UNE TRÈS GRANDE CONSTELLATION dont les étoiles sont relativement peu brillantes. Vers minuit, elle trône dans le ciel près du zénith (noté Z sur l'image).



LES SOIRS DU 21 ET DU 22, 1 HEURE APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune en phase de premier croissant est toute proche de Vénus et de Mars. La scène prend place vers le couchant.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de juin

JUPITER La reine des planètes, très brillante, se lève en seconde partie de nuit. Elle occupe le Bélier et, au fil des semaines, devient de mieux en mieux observable en fin de nuit vers l'est.

SATURNE La planète aux anneaux, située dans le Verseau, se lève en milieu de nuit. On la trouve à environ 25° de hauteur au-dessus de l'horizon sud-est quand l'aube s'annonce. Saturne sera visible toute la nuit à la fin de l'été.

L'appli du mois

OBSERVER PRO est une application payante (13,99 euros) en anglais pour iOS destinée à préparer une séance d'astrophotographie. Elle permet la mesure de votre profil d'horizon (présence d'habitations, d'arbres ou tout autre obstacle) et définit ainsi les conditions d'observation des 14 000 objets du ciel profond qu'elle intègre.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Les enfants ne sont pas « O.K. »

Des efforts considérables ont été faits dans le graphisme des schémas du 6e rapport du Giec pour les rendre le plus parlants possible. Le plus emblématique s'appuie sur les désormais populaires *warming stripes* (codes-barres climatiques) pour illustrer la manière dont le climat a déjà changé et changera tout au long de la vie de trois générations représentatives, nées en 1950, 1980 et 2020. Elles représentent l'évolution de la température moyenne du globe depuis 1850 par une succession de fines bandes verticales colorées, une par année : des dégradés de bleu pour les années froides, de rouge pour les années chaudes. Les années passées, tirant vers l'orangé, matérialisent le réchauffement en cours. Elles se prolongent par cinq futurs climatiques possibles dont la rougeur dépend de nos émissions de gaz à effet de serre à venir.

En ajoutant des icônes générationnelles, l'illustration humanise ces futurs climatiques et montre à quel point le monde que connaîtront les générations actuelles et futures dépend des choix et actions engagées aujourd'hui et à court terme. Si les ambitions se limitent aux politiques climatiques actuelles, qui conduisent à un monde à +3 °C environ, les personnes nées en 2020 seront confrontées en moyenne à sept fois plus de vagues de chaleur au cours de leur vie que leurs grands-parents. Dans un monde à 1,5 °C, ce facteur d'exposition serait ramené à quatre. Chaque émission de gaz à effet de serre accroît les menaces pour les générations les plus jeunes. De quoi réfléchir à la dimension climatique de la nécessaire solidarité entre générations. Les enfants ne seront pas « O.K. » sans nous, maintenant. ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

MATHÉMATIQUES PAR SYLVIE BENZONI

L'énergie d'Emmy Noether

Que d'énergies ! Sans parler de son usage dans des thérapies non scientifiques, le mot « énergie » est omniprésent, souvent affublé d'une épithète dans le langage courant : solaire, nucléaire, fossile, hydraulique, éolienne… En sciences physiques, les épithètes sont également nombreuses : cinétique, potentielle, thermique, électromagnétique… On apprend à l'école que l'énergie est une quantité mesurée en joule et qui est conservée lorsque le système physique considéré est isolé. Plus tard, on peut rencontrer la célèbre formule $E = mc^2$ de la théorie de la relativité restreinte. Pour une mathématicienne, il est perturbant qu'une notion ne réponde pas à une définition claire et nette. J'ai donc poussé dans ses retranchements un collègue physicien. Et la discussion nous a ramenés à… une mathématicienne ! Pas Émilie du Châtelet, qui menait au XVIIIe siècle des expériences sur l'énergie cinétique, mais l'Allemande Emmy Noether, mathématicienne du début du XXe siècle ayant démontré comment les symétries d'un système physique sont reliées à des quantités conservées. Sans surprise, l'énergie de la mécanique classique fait partie de ces quantités. Cependant, une contribution majeure d'Emmy Noether à la physique mathématique a été d'éclaircir la question de l'énergie dans la théorie de la relativité générale. Cette contribution lui avait valu l'estime d'Albert Einstein, entre autres. Elle reste curieusement méconnue aujourd'hui. Une exposition sur Emmy Noether vient de démarrer à l'Institut Henri-Poincaré, à Paris (jusqu'au 30 septembre)*. ■

* Renseignements : sciav.fr/916IHP

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Hommage à Gordon Moore

Pionnier et visionnaire de l'informatique, l'Américain Gordon Moore vient de décéder en mars à l'âge de 94 ans. Il est surtout connu pour la loi éponyme de croissance exponentielle de la puissance de calcul des microprocesseurs. Pour en comprendre la portée, rappelons-en la genèse. Chimiste de formation, Gordon Moore poursuivit des recherches sur les semi-conducteurs avant d'être recruté par William Shockley, prix Nobel de physique et inventeur du transistor, dans un laboratoire de pointe à Palo Alto (États-Unis). En 1957, il le quitta avec sept de ses camarades pour fonder la Fairchild Camera and Instrument Corp., et plus tard, en 1968, la société de microprocesseurs Intel (contraction de Integrated Electronics) qu'il dirigera à partir de 1975. En 1959, Robert Noyce, cofondateur d'Intel, conçut les premiers circuits intégrés, à l'origine de tous les processeurs actuels. Six ans après, en 1965, alors que ces circuits ne comprenaient qu'une cinquantaine de composants, Gordon Moore publia dans le journal *Electronics* un article dans lequel il pressentait que, d'ici à 1975, le nombre total de composants d'un circuit doublerait tous les ans pour atteindre 65 000 dix ans plus tard, ce qui s'est vérifié. Toujours dans le même article, Gordon Moore anticipait les conséquences de cette croissance, en particulier l'existence d'ordinateurs personnels… Et depuis, ce rythme de croissance exponentiel s'est poursuivi indéfectiblement, même s'il a été un peu infléchi à partir de 1975. Cette loi servit d'argument à bon nombre de transhumanistes selon qui la puissance, et donc l'intelligence des processeurs, dépasserait bientôt l'intelligence humaine. Outre que l'intelligence ne se réduit pas à la vitesse de calcul, cette hypothèse présuppose une poursuite indéfinie de la loi de Moore. Se prolongera-t-elle ? Aujourd'hui, les avis divergent. Déjà, en 2015, alors que l'on célébrait le 50e anniversaire de cette loi, Gordon Moore exprimait ses doutes, s'opposant ainsi à la doctrine officielle de la société Intel qu'il avait pourtant créée et dirigée : *« Un jour, elle devra s'arrêter »*, *« rien d'exponentiel n'advient indéfiniment »*. Saluons sa modestie, sa perspicacité et sa sagesse ! ■

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

L'Égypte, toujours une passion française. Paraphrasant le titre de l'ouvrage de Robert Solé, on relève le succès de Ramsès II à Paris. Plus de 145 000 billets vendus avant même l'ouverture de l'exposition à la Grande Halle de la Villette qui se tient jusqu'au 6 septembre. Et peu de dates encore disponibles dès début mai. L'un de ses temps forts est la présentation du cercueil du pharaon *(lire* S. et A. *n° 915)*. C'est un prêt exceptionnel de l'Égypte à notre pays, fait en souvenir du sauvetage en 1976 de la momie, traitée dans l'Essonne par des rayons gamma : ils eurent raison des champignons et bactéries qui dégradaient le corps de la momie. **O. L.**

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

GÉOLOGIE

Séismes : quelles sont les zones à risque dans l'Hexagone ?

Laurence O. A.

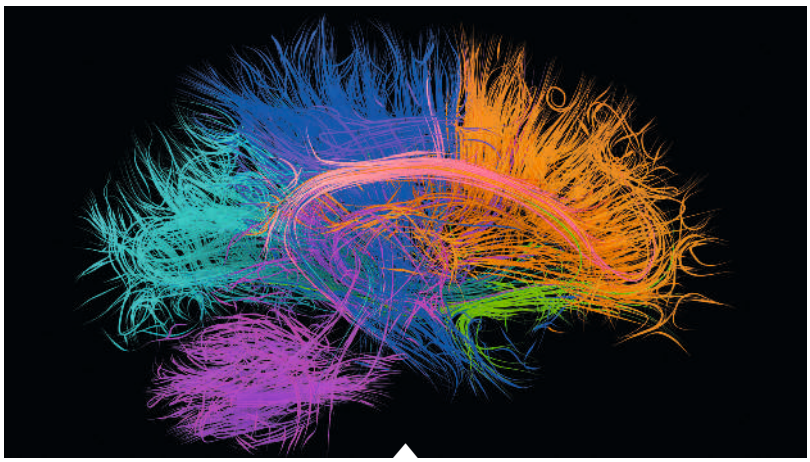
Quelque 4000 séismes ont lieu dans l'Hexagone tous les ans, mais seulement une dizaine est ressentie par la population. L'Alsace, le Midi-Pyrénées, les Alpes et le littoral méditerranéen sont les régions le plus souvent touchées. Le zonage sismique français définit un risque « moyen » le long des Pyrénées, dans certaines régions des Alpes et autour de Mulhouse. Le risque est « modéré » dans six zones : une première bande longeant les frontières de l'est, du Bas-Rhin jusqu'aux Alpes-Maritimes, une deuxième longeant le nord des Pyrénées, une troisième englobant la Vendée et les Deux-Sèvres, une partie du Puy-de-Dôme et de la région nord. ■ **Lise Loumé** @Lise_Loume

ZOOLOGIE

Quels animaux vivent le plus longtemps ?

Frédéric B.

Chez les vertébrés, l'espèce à la plus grande longévité sur la terre ferme est la tortue géante des Seychelles (le record est actuellement de 191 ans), mais dans les mers, la tortue est battue par le requin du Groenland — 400 ans ! — dont la longévité serait due à son développement très lent. Chez les invertébrés comme les mollusques, les éponges ou les coraux, cette espérance de vie peut être bien plus élevée. En 2013, des chercheurs ont estimé l'âge d'une praire d'Islande à 507 ans. Ajoutons à cela les coraux ou les éponges, dont l'âge peut dépasser les milliers d'années, ou encore la méduse *Turritopsis nutricula*, dont on suppose l'immortalité biologique. ■ **Nora Durbecq**



THOM LEACH/ SPL/ SUCRE SALÉ

Le quotient intellectuel des individus nés après 1975 déclinerait, selon une étude norvégienne (vue d'artiste des voies nerveuses du cerveau humain).

NEUROSCIENCES

Le QI de la population baisse-t-il de génération en génération ?

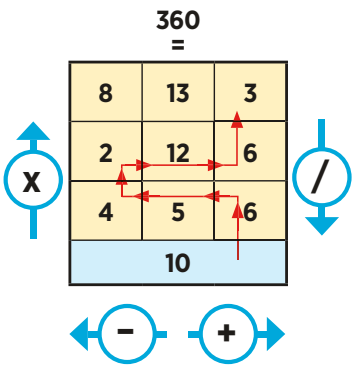
Jeanne B.

Le quotient intellectuel (QI) baisserait en effet chez les générations nées après 1975, selon des chercheurs norvégiens. Leurs travaux, publiés en 2018 dans la revue *Pnas*, tentent d'identifier les causes de la « réversion de l'effet Flynn » : ce phénomène décrit une hausse du QI tout au long de l'histoire de l'humanité. Elle se serait arrêtée à la fin du XX^e^ siècle, et le QI baisserait depuis. Pour le démontrer, les chercheurs se sont penchés sur les performances intellectuelles de plus de 700 000 hommes norvégiens nés entre 1962 et 1991 et testés à l'occasion du service militaire obligatoire. L'intérêt de l'étude est de comparer les QI de frères, donc de personnes issues d'un milieu social identique, et dont les gènes sont proches. Chez ces frères, le QI s'est élevé de 0,20 point par an entre la cohorte née en 1962 (99,2 de QI en moyenne) et celle née en 1975 (102,3 de QI en moyenne). Puis il a baissé de 0,33 point par an entre celle née en 1975 et celle née en 1991 (99,4 de QI en moyenne). Si les scores ne sont pas disponibles pour les femmes, l'examen des résultats scolaires à la place des QI a permis aux auteurs de retrouver la même tendance. Selon eux, l'explication la plus plausible est un environnement culturel moins favorable pour les jeunes générations, en particulier la qualité de l'éducation et des médias. Attention toutefois : le QI n'est pas un parfait synonyme d'intelligence. *« Des génies reconnus n'ont pas forcément un haut QI »*, rappelaient des psychologues dans une étude américaine en 2017 *(lire* S. et A. *n° 815)*. ■

Camille Gaubert @CamilleGaubertb

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 915, mai 2023

Labyrinthmétique



Nombres croisés

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	5	7	1	1
2	1	9	■	0	0	0	0
3	1	5	5	9	■	1	0
4	1	1	0	■	1	8	0
5	1	4	1	4	2	■	0
6	1	■	0	2	4	2	0
7	1	4	0	1	4	0	0

Logique nationale

ESPAGNE. Ce sont les seules lettres qui ne sont pas aussi des chiffres romains.

À cloche-lettres

PORTE AVIONS, de 3 en 3, lecture en sens inverse des montres.

Le chemin des facteurs

Par exemple :
13, 40, 63, 22, 27, 55, 48, 49, 12, 5

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 908 7 traitements qui révolutionnent la médecine

N° 909 L'avant Big Bang

N° 910 La science lit dans les pensées

N° 911 Les origines de la vie

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

N° 913 Fusion nucléaire : une révolution pour l'humanité

N° 914 Les clés du contrôle de soi

N° 915 Les solutions pour produire son énergie

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France). Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 908 ❑ N° 909 ❑ N° 910 ❑ N° 911
❑ N° 912 ❑ N° 913 ❑ N° 914 ❑ N° 915

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

La somme de mille

L'écriture de tous les entiers de zéro à mille utilise un certain nombre de chiffres.

Quelle est la somme de ces chiffres ?

La fable cachée

Une fable de La Fontaine se cache logiquement dans cette liste :

OPALE, ACAJOU, VIOLET, AMANDE, ABRICOT, PÉTROLE, KAKI, PIERRE, AMBRE, CRÈME, OCRE, CITRON, VIOLET, GRÈGE, TAUPE, CHOCOLAT, MOUTARDE, BLANC, GLAUQUE, LILAS, INCARNAT, BEIGE, VERT

Surveillant Éden

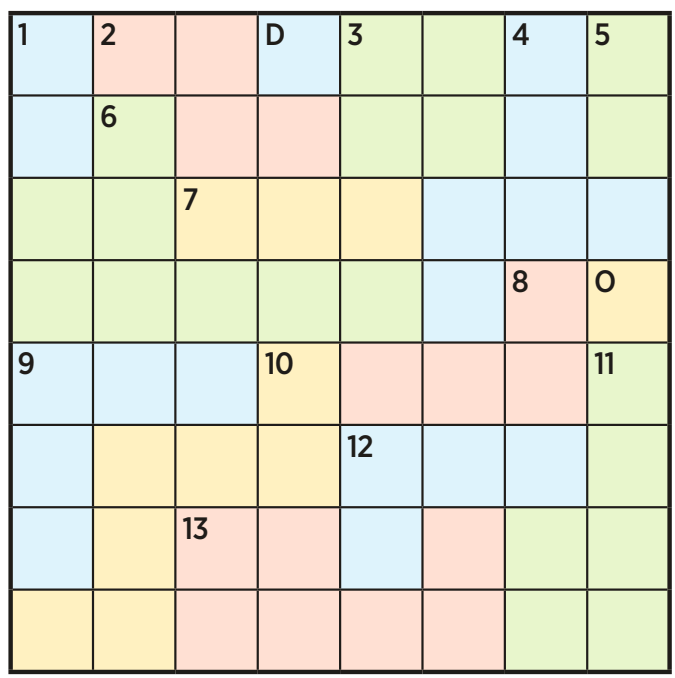
Ève et Adam embauchent un gardien pour surveiller leur jardin. Quels chiffres doivent remplacer les lettres pour que la multiplication soit juste ?

		A	D	A	M	
		x	È	V	E	
	.	.	.	.	.	
	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.		
G	A	R	D	I	E	N

Panagramme

Chaque ligne et chaque colonne contiennent les lettres de « LE SOUDAN ». Toutes les lignes sont différentes ainsi que toutes les colonnes. Dans chaque zone colorée il y a un mot dont la définition correspond au numéro en haut à gauche de la zone. Si la zone contient une lettre, c'est la lettre elle-même. Les lettres de ces mots sont mélangées. Reconstituez la grille.

Définitions. 1 - Citroën mythique / 2 - Prénom féminin / 3 - Attache / 4 - Attrista 5 - Grecque / 6 - Valseuse / 7 - Métal raccourci / 8 - Personnel / 9 - Mit de côté 10 - Elles nous gardent petits / 11 - Revêtements de sol / 12 - Préposition 13 - Un successeur de Chirac



L'heure de l'église

L'horloge de l'église sonne très classiquement, à chaque heure, le nombre de coups correspondant à l'heure indiquée. On observe qu'elle met six secondes à sonner 5 heures et 12 secondes à sonner 9 heures.
Combien de temps par jour l'horloge sonne-t-elle, sachant que le temps pour sonner le coup d'une heure n'est pas mesurable ?

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5 €**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

CODE PRIVILÈGE : **CS442**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6 € 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5 € 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids**. *(1), (2), (5).*

6 € 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel**.

6 € 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6 € 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences**. *(1), (10).*

6 € 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire**.

5 € 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux**. *(6), (8).*

Allergène : ***poisson***.

5 € 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** et possède un **effet cardioprotecteur**. *(7).*

6 € 30 gélules

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran Bio aide à **améliorer l'érection** et **stimule le désir sexuel**. *(2), (4).*

6 € 20 gélules

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire**.

6 € 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie**. *(1), (2), (9).*

6 € 45 gélules

Capacité sexuelle
TRIBULUS

Il favorise le **désir**, la **capacité** et les **performances sexuelles** et participe à la bonne santé des organes reproducteurs. *(2), (11).*

6 € 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité**. Ni accoutumance, ni somnolence.

6 € 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5 € 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6 € 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

LE VENTILATEUR "FRESH +"

OFFERT

Dimensions : 13,8 x 9,8 x 12,2 cm.
Matière : plastique.
Câble USB fourni.

Les Frais de Port RÉDUITS

au lieu de ~~6,50 €~~ **2 € SEULEMENT**

dès 5 € Tous vos produits

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	6,00€
LE VENTILATEUR "FRESH +"	OFFERT
Frais de port	2,00€
TOTAL	**30,00€**

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. (11) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| 19|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Recommandé pour la livraison.* de **ses partenaires ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_| |_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PGRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon VENTILATEUR "Fresh +" et mon CATALOGUE				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'ajoute 2€ de frais de port**				
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS442**	**TOTAL À RÉGLER**			.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50 € de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque, avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité Fevad · synadiet · La Poste

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

JACOBS DOUWE EGBERTS FR SAS | 30 BIS, RUE DE PARADIS, 75010 PARIS, FRANCE, 810 029 413 RCS PARIS | SAS AU CAPITAL DE 16 594 157,70 EU ROS.

L'OR

CAFÉ HAUTE DÉGUSTATION

L'OR SANS DOUTE LE MEILLEUR CAFÉ DU MONDE

POUR VOTRE SANTÉ, ÉVITEZ DE MANGER TROP GRAS, TROP SUCRÉ, TROP SALÉ. WWW.MANGERBOUGER.FR